



**TUGAS AKHIR – TF 141581**

**AUDIT ENERGI PADA PEMBANGKIT LISTRIK  
TENAGA UAP UNTUK MENINGKATKAN  
PRODUKSI ENERGI LISTRIK ( STUDI KASUS DI  
PT. JAWA POWER UNIT 5 SITUBONDO- JAWA  
TIMUR)**

**RENDY KRISNANTA PUTRA  
NRP. 2411100035**

**DOSEN PEMBIMBING  
Dr. GUNAWAN NUGROHO, S.T., M.T.  
Ir. SARWONO, M.M.**

**JURUSAN TEKNIK FISIKA  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2015**



**FINAL PROJECT – TF 141581**

**ENERGY AUDIT OF STEAM POWER PLANT TO  
INCREASE THE PRODUCTION OF  
ELECTRICAL ENERGY ( CASE STUDY IN PT.  
JAWA POWER UNIT 5 SITUBONDO- JAWA  
TIMUR)**

**RENDY KRISNANTA PUTRA  
NRP. 2411100035**

**SUPERVISOR  
Dr. GUNAWAN NUGROHO, S.T., M.T.  
Ir. SARWONO, M.M.**

**DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF  
TECHNOLOGY  
SURABAYA 2015**

## **LEMBAR PENGESAHAN**

# **AUDIT ENERGI PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP UNTUK MENINGKATKAN PRODUKSI ENERGI LISTRIK (STUDI KASUS DI PT. JAWA POWER UNIT 5 SITUBONDO- JAWA TIMUR)**

## **TUGAS AKHIR**

Oleh :

**RENDY KRISNANTA PUTRA**  
**NRP : 2411 100 035**

**SURABAYA, 8 April 2015**  
**Mengetahui/Menyetujui**

**Pembimbing I,**



**Dr. Gunawan Nugroho, ST.,MT.**  
**NIPN.19771127 200212 1 002**

**Pembimbing II,**



**Ir. Sarwono, MM**  
**NIPN. 195805301983031002**



**Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA**  
**NIPN. 19650309199002 1 001**

# **AUDIT ENERGI PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP UNTUK MENINGKATKAN PRODUKSI ENERGI LISTRIK ( STUDI KASUS DI PT. JAWA POWER UNIT 5 SITUBONDO- JAWA TIMUR)**

**Nama Mahasiswa : Rendy Krisnanta Putra**  
**NRP : 2411 100 035**  
**Program Studi : S-1 Teknik Fisika**  
**Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS**  
**Pembimbing : 1. Dr. Gunawan Nugroho S.T., M.T.**  
**2. Ir. Sarwono, M.M.**

## **Abstrak**

Penggunaan sumber energi yang kurang efisien menyebabkan terjadinya pemborosan energi. Sektor industri merupakan penggunaan sumber energi terbesar, sehingga terjadinya pemborosan energi juga besar. Salah satunya yaitu di PLTU milik PT. Jawa Power Unit 5. Untuk mengurangi pemborosan energi, yang harus diminimalkan yaitu *heat losses*. *Heat losses* dapat diketahui dengan melakukan audit energi yang bertujuan mengetahui peralatan yang mengalami pemborosan energi. Berdasarkan hasil audit energi dan representasi dengan diagram sankey pada kondisi beban 100%, jumlah panas yang masuk sebesar 1.939.557,49 kW, unjuk kerja boiler sebesar 1.225.724,66 kW dengan nilai efisiensi boiler sebesar 63,19%, unjuk kerja turbin uap sebesar 690.432,22 kW dengan nilai efisiensi 53,92%, unjuk kerja pompa sebesar 18.667,97 kW dengan nilai efisiensi 33,81%, unjuk kerja kondenser 341.415,75 kW, dan nilai efisiensi thermal sebesar 34,63%. Pemborosan energi terbesar pada boiler dengan *losses* sebesar 713.951,11 kW, *losses* pada turbin sebesar 26.594,1 kW, *losses* pada pompa sebesar 4.013,71 kW. Rekomendasi yang dapat diterapkan Penambahan *air heater* didapatkan nilai ekonomis sebesar Rp. 5.577.365/ jam

**Kata Kunci : Audit Energi, Heat Losses, Sankey Diagram**

***ENERGY AUDIT OF STEAM POWER PLANT FOR  
INCREASING PRODUCTION OF ELECTRIC ENERGY (CASE  
STUDY IN PT. JAWA POWER UNIT 5 SITUBONDO- JAWA  
TIMUR)***

***Name*** : ***Rendy Krisnanta Putra***  
***NRP*** : ***2411 100 035***  
***Program Study*** : ***S-1 Physics Engineering***  
***Department*** : ***Physics Engineering FTI-ITS***  
***Lecture*** : ***1. Dr. Gunawan Nugroho S.T., M.T.***  
***2. Ir. Sarwono, M.M.***

***Abstract***

The use of energy sources that are less efficient cause energy waste. The industrial sector is the largest energy source, so that energy wastage is also great. One of them is in the power plant owned by PT. Java Power Unit 5. To reduce energy waste, which must be minimized, namely heat losses. Heat losses can be determined by performing an energy audit aimed to know the equipment experiencing energy waste. Based on the results of an energy audit and representations with Sankey diagram at 100% load conditions, the amount of heat entering 1.939.557,49 kW boiler performance with a value of 1.225.724,66 kW boiler efficiency by 63.19%, the performance of the turbine amounting to 690.432,22 kW steam with the efficiency of 53.92%, the performance of 18.667,97 kW pump with an efficiency of 33.81%, the performance of the condenser 341.415,75 kW, and the value of the thermal efficiency of 34,63%. Biggest energy waste in boilers with losses amounting to 713.951,11 kW boiler losses amounted to 26594.1 kW turbine, the losses amounted to 4013.71 kW pump. Recommendations that can be applied Additions air heater obtained the economic value of Rp. 5.577.365/ hour

**Keyword : Audit Energi, Heat Losses, Sankey Diagram**

## KATA PENGANTAR

Puji syukur alhamdulillah kami panjatkan kehadiran Allah SWT, berkat rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul :

### **“AUDIT ENERGI PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP UNTUK MENINGKATKAN PRODUKSI ENERGI LISTRIK ( STUDI KASUS DI PT. JAWA POWER UNIT 5 SITUBONDO- JAWA TIMUR)”.**

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan dan penyusunan laporan Tugas Akhir ini. Untuk itu penulis mengucapkan terimakasih atas bantuan dan motivasi kepada :

1. Bapak Dr. Gunawan Nugroho, S.T., M.T. selaku pembimbing penulis, yang selalu memberikan bimbingan serta dukungan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Ir. Sarwono, M.M. selaku dosen pembimbing penulis dan kepala Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan.
3. Bapak Dr. Ir. Totok Suhartanto, DEA selaku ketua Jurusan Teknik Fisika ITS.
4. Bapak Ir. Jerry Susatio, M.T selaku dosen pembimbing.
5. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika yang telah memberikan ilmu selama kuliah.
6. Bapak Jaumiddin selaku bagian *Human Resource Development*

7. Bapak Wahyu Hikmawan selaku Kepala *Main Plant Operation Section*
8. Bapak Irmawan serta Bapak Luffi selaku staff bagian *Main Plant Operation Section*.
9. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika yang telah memberikan ilmu selama kuliah.
10. Keluarga penulis yang senantiasa mendukung, ayahanda (Siswahyudi), Ibunda (Retno Aprianingsih H), Kakak (Angga Wahyu Saputra, S.T.), dan adik (Firdha Farah Pramesti) beserta keluarga yang tidak bisa saya sebutkan satu per satu.
11. Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan, yang telah memberikan tempat berdiskusi dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
12. Rekan-rekan yang namanya tidak bisa saya sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa penyusunan laporan Tugas Akhir ini masih belum sempurna, untuk itu saran serta kritik yang membangun sangat diharapkan. Penulis berharap semoga laporan ini bermanfaat bagi pembacanya.

Surabaya, April 2015

Penulis,

# DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	v
ABTRACT.....	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Ruang Lingkup Penelitian .....	4
1.4 Tujuan.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Audit Energi.....	7
2.2 Keseimbangan Massa dan Energi .....	8
2.3 Analisis Energi dan Diagram Sankey.....	9
2.4 Proses Produksi .....	10
2.5 Siklus Rankine .....	12
2.6 Komponen Utama dalam PLTU .....	13
2.6.1 Boiler .....	13
2.6.2 Turbin Uap .....	18
2.6.3 Pompa .....	19
2.6.4 Kondenser .....	20
2.7 Efisiensi Sistem .....	21
2.8 Software HYSYS .....	21
BAB III METODOLOGI	
3.1 Tahap Penelitian.....	23
3.2 Spesifikasi Komponen.....	26
3.3 Tahap Perhitungan Unjuk Kerja Komponen .....	27
3.4 Panas Masuk .....	28
3.4.1 Panas Masuk Operasional.....	28
3.4.2 Panas Masuk Aktual.....	28
3.5 Unjuk Kerja Boiler .....	29
3.5.1 Unjuk Kerja Boiler Operasional.....	29



3.5.2 Unjuk Kerja Boiler Aktual.....	31
3.5.3 Menghitung Efisiensi Boiler .....	33
3.6 Unjuk Kerja Turbin Uap.....	36
3.6.1 Perhitungan Unjuk Kerja Operasional Turbin Uap.....	36
3.6.2 Perhitungan Unjuk Kerja Aktual Turbin Uap	38
3.6.3 Efisiensi Aktual Turbin Uap .....	39
3.6.4 Efisiensi Operasional Generator .....	41
3.6.5 Efisiensi Aktual Generator.....	42
3.7 Unjuk Kerja Pompa.....	42
3.7.1 Perhitungan Unjuk Kerja Operasional Pompa .....	42
3.7.2 Perhitungan Unjuk Kerja Aktual Pompa .....	43
3.7.3 Perhitungan Efisiensi Pompa .....	45
3.8 Unjuk Kerja Kondenser.....	46
3.8.1 Perhitungan Unjuk Kerja Operasional Kondenser .....	46
3.8.2 Perhitungan Unjuk Kerja Aktual Kondenser	46
3.9 Simulasi HYSYS .....	47
3.10 Tahap Perhitungan Efisiensi Sistem.....	49
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1 Analisa Keseimbangan Energi dan Diagram Sankey	51
4.2 Unjuk Kerja Boiler .....	54
4.2.1 Analisa Efisiensi Boiler .....	55
4.3 Unjuk Kerja Turbin Uap.....	57
4.3.1 Analisa Efisiensi Turbin Uap .....	58
4.4 Unjuk Kerja Pompa .....	59
4.4.1 Analisa Efisiensi Pompa .....	59
4.5 Unjuk Kerja Kondenser .....	60
4.6 Efisiensi Thermal .....	61
4.7 Panas yang Masuk ke Boiler .....	62
4.8 Profil Produksi Daya Listrik .....	63
4.9 Perbandingan Panas Masuk, Unjuk Kerja Boiler dan Produksi Listrik.....	63
4.10 Hasil Simulasi HYSYS .....	65
4.11 Potensi Penghematan .....	66
4.12 Rekomendasi .....	69
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1 Kesimpulan .....	69
5.2 Saran .....	69

DAFTAR PUSTAKA  
LAMPIRAN A  
LAMPIRAN B

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Spesifikasi Boiler .....	26
Tabel 3.2	Spesifikasi Turbin Uap .....	26
Tabel 3.3	Spesifikasi Pompa .....	27
Tabel 3.4	<i>Input Boiler 100% Full Load</i> .....	29
Tabel 3.5	<i>Output Boiler 100% full load</i> .....	30
Tabel 3.6	Interpolasi Temperatur 538 °C .....	30
Tabel 3.7	Data Economizer .....	31
Tabel 3.8	Data Evaporator .....	32
Tabel 3.9	Data Superheater .....	32
Tabel 3.10	Data <i>Coal Fired Boiler</i> .....	33
Tabel 3.11	Data <i>Fuel Analysis</i> .....	34
Tabel 3.12	<i>Summary of Heat Coal Fired Boiler</i> .....	35
Tabel 3.13	Data Operasional HP turbin 100% <i>Full Load</i> .....	36
Tabel 3.14	Data Operasional IP turbin 100% <i>Full Load</i> .....	36
Tabel 3.15	Data Operasional LP turbin A 100% <i>Full Load</i> .....	37
Tabel 3.16	Data Operasional LP turbin B 100% <i>Full Load</i> .....	37
Tabel 3.17	Data aktual HP turbin 100% <i>Full Load</i> .....	38
Tabel 3.18	Data aktual IP turbin 100% <i>Full Load</i> .....	38
Tabel 3.19	Data aktual LP turbin A 100% <i>Full Load</i> .....	38
Tabel 3.20	Data aktual LP turbin B 100% <i>Full Load</i> .....	39
Tabel 3.21	Data Operasional CEP 100% <i>Full Load</i> .....	42
Tabel 3.22	Data Operasional TFWP 100% <i>Full Load</i> .....	43
Tabel 3.23	Data aktual CEP 100% <i>Full Load</i> .....	43
Tabel 3.24	Data aktual TFWP 100% <i>Full Load</i> .....	44
Tabel 3.25	Data aktual BWCP 100% <i>Full Load</i> .....	44
Tabel 4.1	Unjuk Kerja dan <i>Losses</i> Komponen .....	51
Tabel 4.2	Perbandingan nilai efisiensi boiler .....	55
Tabel 4.3	Perbandingan nilai efisiensi turbin uap .....	58
Tabel 4.4	Perbandingan nilai efisiensi pompa .....	59

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Keseimbangan Massa dan Energi .....	8
Gambar 2.2 Diagram Sankey .....	9
Gambar 2.3 Skema PLTU Paiton Unit 5 .....	10
Gambar 2.4 Blok Diagram PLTU Paiton Unit 5 .....	10
Gambar 2.5 Diagram Alir Siklus Rankine <i>Reheater</i> .....	12
Gambar 2.6 Diagram T – S Siklus Rankine <i>Reheater</i> .....	12
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian .....	25
Gambar 3.2 Pemilihan <i>Fluid Package</i> .....	47
Gambar 3.3 <i>Material Stream</i> .....	47
Gambar 3.4 Simulasi HYSYS .....	48
Gambar 4.1 Diagram Sankey Penelitian .....	52
Gambar 4.2 Unjuk Kerja Boiler .....	54
Gambar 4.3 Unjuk Kerja Turbin Uap .....	57
Gambar 4.4 Unjuk Kerja Pompa .....	59
Gambar 4.5 Unjuk Kerja Kondenser .....	60
Gambar 4.6 Grafik Efisiensi Thermal .....	61
Gambar 4.7 Grafik Jumlah Panas yang Masuk .....	62
Gambar 4.8 Grafik Produksi Daya Listrik .....	63
Gambar 4.9 Grafik Jumlah Panas yang Masuk ke Boiler, Unjuk Kerja dan Produksi Listrik .....	64
Gambar 4.10 Grafik Efisiensi Pompa .....	65
Gambar 4.11 Grafik Efisiensi Turbin .....	65

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Indonesia merupakan negara kaya akan sumber daya alam, tetapi semua sumber daya alam yang ada belum dimanfaatkan secara efisien. Berdasarkan data Pusdatin ESDM 2011, pada tahun 2010 konsumsi minyak bumi sebesar 489,67 juta SBM atau 34% dari seluruh konsumsi energi dan batubara sebesar 288,04 juta SBM atau 20% dari seluruh konsumsi energi. Selain itu, konsumsi energi terbesar terdapat pada sektor industri dengan persentase 34%, persentase ini menyebabkan peluang terjadinya pemborosan energi di sektor industri lebih besar daripada sektor rumah tangga, komersial dan transportasi.

Berdasarkan kondisi tersebut dibutuhkan sebuah konservasi energi. Konservasi energi adalah sebuah upaya sistematis, terencana, dan terpadu guna melestarikan sumber daya energi dalam negeri serta meningkatkan efisiensi pemanfaatannya (sesuai UU no 30 tahun 2007). Upaya tersebut dapat tercapai dengan 2 cara, cara makro seperti pemerintah membuat sebuah kebijakan-regulasi, seperti Permen ESDM no 14 tentang manajemen energi dan cara mikro seperti melakukan audit energi. Konservasi energi harus dilakukan karena berdasarkan data Pusdatin ESDM 2011, diperkirakan konsumsi energi tiap tahun mengalami kenaikan sebesar 5,6% per tahun, sedangkan sumber daya energi yang ada terbatas.

PT Jawa Power unit 5 merupakan salah satu perusahaan yang bergerak dibidang industri pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang dioperasikan oleh PT. YTL Jawa Timur berada di kompleks pembangkit listrik di Kecamatan Paiton, Kabupaten Probolinggo. Energi listrik maksimal pada kondisi desain

yang dapat dihasilkan oleh PT. Jawa Power sebesar 650 MW per unit, sedangkan PT. Jawa Power mempunyai dua unit sehingga total produksi listrik yang dapat dihasilkan sebesar 1300 MW.

Pada PLTU terdapat peralatan utama dan pendukung. Peralatan utama adalah peralatan pokok yang diperlukan dalam proses produksi listrik mulai dari pengolahan bahan baku sampai menghasilkan produk berupa energi listrik. Peralatan utama PLTU seperti boiler, turbin uap, kondenser dan pompa [2]. Selain itu terdapat juga peralatan pendukung seperti *conveyor*, *generator*, *mill*, *heater*, *fan*, *transformator step up* dan *steam drum*. Peralatan yang ada harus mempunyai kondisi kerja baik sehingga dapat bekerja secara efisien. Untuk meningkatkan efisiensi, dilakukan perawatan secara berkala pada peralatan yang ada. Salah satu bagian penting yang harus diminimalkan yaitu *heat losses*. Untuk meminimalkan *heat losses* dibutuhkan audit energi.

Tahapan proses audit energi dimulai dengan tahap persiapan, survey, analisis dan menyusun laporan. Pada tahap persiapan audit energi, langkah pertama mempersiapkan perlengkapan administrasi perijinan, membuat jadwal dan rencana kegiatan. Tahap survey, mengumpulkan beberapa data yang dibutuhkan dalam mengidentifikasi konsumsi energi, data dapat berasal dari melihat langsung pada *plant*, mencatat data pada instrumen terpasang bisa dalam *control room* atau melakukan pengukuran secara langsung. Tahap analisis menghitung kinerja peralatan dan efisiensi dengan analisa termodinamika. Melakukan evaluasi dengan mengetahui besar *heat losses* peralatan dengan menggunakan analisa keseimbangan massa dan energi [4], dan mengidentifikasi potensi penghematan energi. Potensi penghematan energi ada 3 macam seperti tanpa investasi, investasi sedang dan investasi besar. Tahap terakhir yaitu menyusun laporan dimana terdapat peluang rekomendasi yang dapat dilakukan dengan prioritas potensi penghematan.

Rekomendasi tidak hanya non teknis tetapi juga teknis. Dalam rekomendasi teknis potensi penghematan yang dilakukan termasuk investasi besar karena berhubungan dengan merubah proses yang ada di sistem. Sebelum melakukan rekomendasi teknis, potensi penghematan dapat dilakukan dengan membuat simulasi perhitungan menggunakan *software* HYSYS versi 7.3 dan membandingkan nilai efisiensi sistem desain dengan *software*, kemudian menentukan peluang potensi penambahan peralatan.

*Software* HYSYS yang digunakan berfungsi sebagai simulasi proses didalam *plant* yang ada, dengan menggunakan *software* ini mempermudah dalam melakukan analisa perhitungan dan dapat dikerjakan dengan waktu efisien [5]. Langkah awal dalam melakukan simulasi yaitu mendapatkan data kondisi awal pada *plant* / kondisi *commisioning*, data dari sistem kontrol dan *monitoring* pada *plant* aktual, data yang diberikan dari *operator engineer* dan dasar perhitungan dari *heat and mass balances* [6]. Selanjutnya, membuat proses produksi ke dalam diagram alir proses (PFD) dan menghitung nilai keseimbangan massa dan energi pada setiap peralatan. Selain itu, dapat mengevaluasi kinerja peralatan yang sudah ada, sehingga *software* ini dapat membantu dalam pengerjaan penelitian ini dengan memberikan rekomendasi penambahan peralatan demi meningkatkan efisiensi sistem.

Penelitian yang pernah dilakukan oleh Tveit Tor Martin, 2003 tentang proses simulasi beserta data – data yang dibutuhkan dalam melakukan simulasi, seperti data dari desain *plant*, data kontrol dan monitor sistem, beserta perhitungan keseimbangan energi dan massa [6]. Selain itu, terdapat penelitian oleh Lutfiatus Fitria, 2014 tentang audit energi di dalam gas turbin generator, yang mana berisi tentang data konsumsi bahan bakar, penggunaan energi listrik, besarnya produksi energi listrik, spesifikasi tiap komponen, nilai kompresor suhu dan tekanan (*input-output*), nilai turbin suhu dan tekanan (*input-output*), kemudian didapatkan nilai

efisiensi dari sistem yang kemudian didapatkan sebuah rekomendasi dalam penghematan [8]. Selain itu, terdapat juga penelitian oleh Nungky Ristyanto, dalam penelitian tersebut juga berisi tentang proses kerja tiap komponen, perhitungan efisiensi thermal, variasi konsumsi bahan bakar, serta melakukan simulasi [9].

## 1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam pelaksanaan penelitian Tugas Akhir ini antara lain :

- Bagaimana melakukan perhitungan nilai efisiensi dan unjuk kerja komponen utama PLTU (boiler, turbin uap, kondenser, dan pompa)
- Bagaimana melakukan identifikasi pemborosan energi komponen utama dan peluang penghematan energi pada proses produksi listrik di PT Jawa Power
- Bagaimana melakukan simulasi untuk meningkatkan efisiensi thermal di PT Jawa Power Unit 5 dengan menggunakan *software* HYSYS versi 7.3

## 1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang Lingkup Penelitian dalam pelaksanaan penelitian Tugas Akhir ini antara lain :

- Penelitian dilakukan di PT Jawa Power Unit 5 Situbondo
- Jenis batubara yang digunakan Kideco Coal dengan nilai HHV 4200 kCal/kg dan harga beli batubara US\$ 51,21/ ton atau bernilai Rp 614,53/ kg dengan asumsi nilai kurs 1US\$ = Rp 12.000 (Ditjen Minerba pada bulan Januari 2014)
- Sistem PLTU beroperasi pada keadaan tunak (*steady state*)



## 1.4 Tujuan

Tujuan dalam pelaksanaan penelitian Tugas Akhir ini antara lain :

- Untuk mengetahui perhitungan nilai efisiensi dan unjuk kerja komponen utama PLTU (boiler, turbin uap, kondenser, dan pompa) dan peluang penghematan energi
- Untuk mengidentifikasi pemborosan energi komponen utama dan peluang penghematan energi pada proses produksi listrik di PT Jawa Power
- Untuk melakukan simulasi peningkatan efisiensi thermal di PT. Jawa Power Unit 5 dengan menggunakan *software* HYSYS versi 7.3

## 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat pada penelitian Tugas Akhir ini yaitu mengetahui nilai efisiensi, unjuk kerja peralatan utama, mengidentifikasi pemborosan energi dan peluang penghematan beserta kemampuan melakukan simulasi *plant* menggunakan *software* HYSYS versi 7.3

**Halaman ini memang dikosongkan**

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Audit Energi**

Audit Energi adalah proses evaluasi pemanfaatan energi dan identifikasi peluang penghematan energi serta rekomendasi peningkatan efisiensi pada pengguna energi dan pengguna sumber energi dalam rangka konservasi energi (PP no 7 tahun 2009). Audit energi berfungsi memahami profil keseluruhan konsumsi energi, seperti jenis energi yang digunakan, intensitas energi, kinerja pemanfaatan energi, potensi penghematan, dan langkah perbaikan yang perlu dilakukan. Berdasarkan tingkat kedalaman yang dihasilkan, kategori audit energi dapat diklasifikasikan menjadi 3 jenis, yaitu (Willhansen, 2012):

- Walk Through Audit (Audit Singkat)

Walk Through Audit merupakan jenis audit energi yang paling sederhana (level 1). Audit ini hanya melakukan pengumpulan data secara umum, melakukan pengamatan singkat secara visual tentang data historis dan melakukan wawancara.

- Preliminary Audit (Audit Energi Awal)

Audit energi awal merupakan jenis audit energi level kedua yang digunakan untuk mendapatkan pola penggunaan energi, melakukan identifikasi potensi penghematan serta menyusun rekomendasi awal. Audit awal membutuhkan data-data sekunder dari hasil pengukuran dan kuisioner sebagai dasar untuk melakukan evaluasi penggunaan energi secara umum dan cepat. Selain itu, melakukan interview dengan operator dapat memperdalam isi audit.

- Detail Audit (Audit Energi Rinci)

Audit energi rinci merupakan jenis audit energi level ketiga dan tertinggi dalam kegiatan audit energi. Audit ini digunakan untuk menginvestigasi lebih lanjut tempat terjadinya pemborosan energi dan melakukan analisis besarnya peluang penghematan energi yang dapat dilakukan secara lebih spesifik. Selanjutnya, diperoleh tempat pemborosan energi dan peluang penghematan energi serta membuat rekomendasi tindak lanjut.

## 2.2 Keseimbangan Massa dan Energi

Dalam sebuah sistem produksi listrik dalam PLTU, menghitung nilai keseimbangan massa dan energi merupakan hal yang penting. Keseimbangan massa berfungsi untuk mengontrol proses yang terjadi, terutama dalam mengontrol jumlah produk dan bahan baku. Jumlah massa yang masuk harus bernilai sama dengan jumlah massa yang keluar [4].

$$\sum mR = \sum mP + \sum mW + \sum mS \quad (2.1)$$

Dimana,

$\sum mR$  = Total Massa Bahan Baku

$\sum mP$  = Total Massa Produk

$\sum mW$  = Total Massa Limbah

$\sum mS$  = Total Massa Akumulasi

Begitupun dengan energi, jumlah energi yang masuk kedalam sistem harus bernilai sama dengan jumlah energi yang keluar [4].

$$\sum ER = \sum EP + \sum EW + \sum EL \quad (2.2)$$

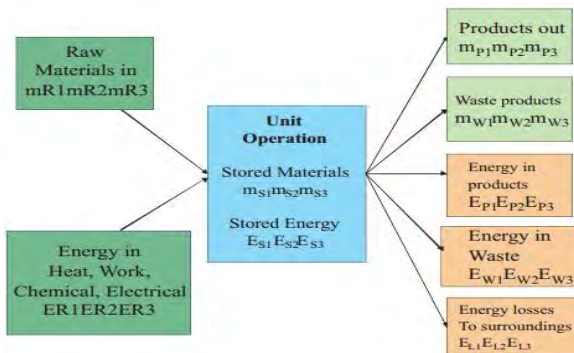
Dimana,

$\sum ER$  = Total Energi Masuk

$\sum EP$  = Total Energi Produk

$\sum EW$  = Total Energi Limbah

$\sum EL$  = Total Energi Hilang



**Gambar 2.1** Keseimbangan Massa dan Energi

### 2.3 Analisis Energi dan Diagram Sankey

Berdasarkan dengan hukum Thermodinamika 1 yang berisi tentang hukum kekekalan energi, energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan, tetapi energi dapat di konversi kebentuk energi yang lain [2]. Seperti, energi panas dari boiler dapat dikonversi menjadi energi kinetik oleh turbin uap.

Dalam melakukan analisis energi yang perlu diperhatikan yaitu keseimbangan massa dan energi dari setiap proses. Untuk mempermudah analisis energi dapat dilakukan dengan persamaan laju energi per satuan waktu [4]:

$$\dot{Q}_{cv} + \sum \dot{m}_{in} \left( h_i + \frac{V_i^2}{2} + g z_i \right) = \dot{W}_{cv} + \sum \dot{m}_{out} \left( h_{out} + \frac{V_{out}^2}{2} + g z_{out} \right) \quad (2.3)$$

Kemudian, dengan melakukan sebuah asumsi bahwa tidak ada energi kinetik dan potensial dalam laju energi per satuan waktu dan mengabaikan perpindahan kalor dengan sekelilingnya, maka persamaan dapat ditulis sebagai berikut :

$$\dot{W}_{cv} = \sum \dot{m}_{out} * h_{out} - \sum \dot{m}_{in} * h_{in} \quad (2.4)$$

Setelah mengetahui besarnya laju energi, kemudian dapat dibuat sankey diagram yang berguna untuk merepresentasikan energi yang masuk dan energi yang keluar dalam sebuah sistem produksi listrik. Biasanya aliran direpresentasikan dengan arah panah. Lebar panah sebanding dengan ukuran laju aktual sehingga dapat dianalisa energi yang dihasilkan mengalami keuntungan atau kerugian supaya manajer energi dapat fokus untuk mencari pengembangan dalam skala prioritas.



**Gambar 2.2** Diagram Sankey



menggunakan *condensate extraction pump* (CEP) sehingga mempunyai tekanan tinggi tetapi suhu air masih rendah. Untuk meningkatkan suhu, air akan mengalami pemanasan awal melalui heater A1, A2, A3, A4 dengan pemanasan dari *exhaust steam* dari LP turbin sehingga keluaran dari heater A4 air dalam kondisi suhu sedang. Selanjutnya, air akan ditampung didalam *storage tank* untuk dilakukan penyimpanan sementara.

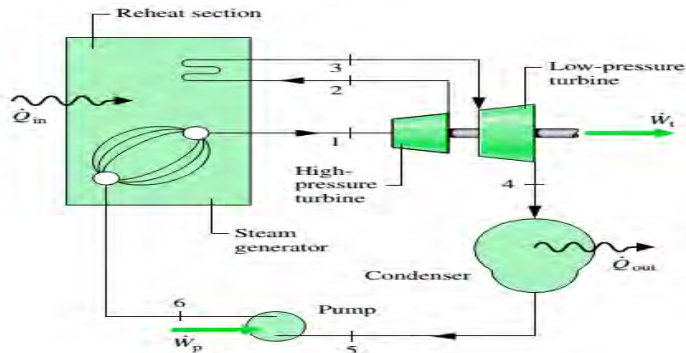
Selanjutnya, air dari *storage tank* di pompa menggunakan TFWP sehingga tekanan air menjadi tinggi dan suhu sedang, untuk memanaskan air agar menjadi tinggi maka air akan dilakukan pemanasan dengan heater A6, A7 dan A8. Air keluaran A8 mempunyai tekanan tinggi dan suhu tinggi, kemudian air akan masuk ke economizer untuk mendapatkan panas dari boiler, kemudian air akan masuk kedalam *steam drum* untuk penyimpanan sementara *steam drum* juga berfungsi memisahkan air dan *steam*. Kemudian air akan dipompa oleh BWCP untuk menuju ke evaporator, di evaporator air akan berubah menjadi *steam*, selanjutnya *steam* akan kembali masuk ke *steam drum*.

Kemudian, *steam* dialirkan kedalam pipa superheater agar menjadi *dry steam*, sehingga uap yang dihasilkan kering. *Steam* yang keluar mempunyai tekanan dan suhu tinggi yang berfungsi untuk memutar HP turbin, steam dari HP turbin akan mengalami pemanasan ulang di *reheater* yang berfungsi untuk meningkatkan efisiensi sistem, dari *reheater* akan masuk ke IP turbin dari IP turbin kemudian ke LP turbin, ketika turbin berputar maka generator akan mengkonversi unjuk kerja turbin menjadi energi listrik, steam yang keluar dari LP turbin mempunyai kualitas uap rendah sehingga kemudian akan masuk kedalam kondenser untuk dilakukan pendinginan. Dikondenser air laut yang digunakan sebagai pendingin sehingga uap akan menjadi air, dan siklus terjadi seterusnya.

## 2.5 Siklus Rankine

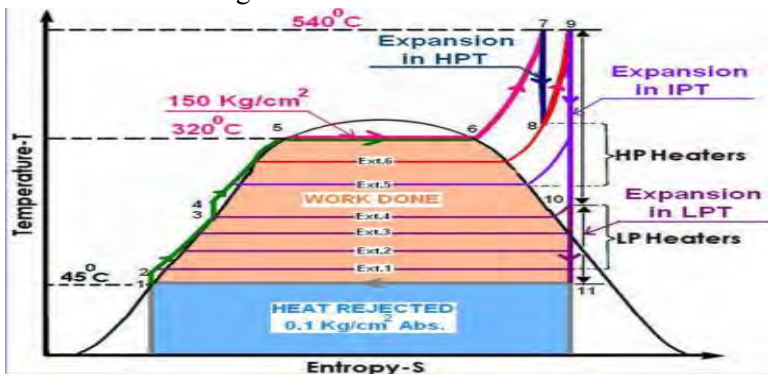
Siklus rankine merupakan sebuah siklus yang digunakan dalam sistem pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Pada PLTU

berisi peralatan utama seperti boiler, turbin uap, kondenser, dan pompa [2]. Peralatan tersebut kemudian digambarkan kedalam siklus rankine. Siklus rankine juga disebut siklus uap-cair, karena pada fase tertentu terdapat 2 siklus yaitu cair dan uap. Berikut adalah gambar skema siklus rankine reheater.



**Gambar 2.5** Diagram Alir Siklus Rankine *Reheater*

Pada diagram diatas menunjukkan proses terjadinya produksi listrik. Berikut ini diagram T-S dari siklus rankine



**Gambar 2.6** Diagram T – S Siklus Rankine *Reheater*

Proses siklus Rankine *reheater* yang dapat dilihat dari diagram diatas adalah sebagai berikut :

- 1 – 2 : Proses pemompaan isentropik, di dalam pompa CEP



- 2 – 3 : Pada proses ini terjadi pemanasan awal dengan menggunakan *heater* A1 sampai A4
- 3 – 4 : Proses pemompaan isentropik, di dalam pompa TFWP
- 4 – 5 : Pada proses ini terjadi pemanasan lanjut dengan menggunakan *heater* A5 sampai A8
- 5 – 7 : Pada proses ini terjadi pemanasan *superheater* didalam boiler untuk merubah fase cair menjadi uap kering
- 7 – 8 : Proses ekspansi isentropik di dalam *high pressure* turbin
- 8 – 9 : Proses pemanasan ulang di *reheater*
- 9 – 11 : Proses ekspansi isentropik di dalam *intermediate*, dan *low pressure* turbin
- 11 – 1 : Pengeluaran kalor atau pengembunan pada tekanan konstan didalam kondenser

## 2.6 Komponen Utama dalam PLTU

### 2.6.1 Boiler

Boiler adalah suatu peralatan yang berfungsi memanaskan air sampai menghasilkan uap kering (*steam*) pada tekanan dan temperature yang tinggi. Di dalam boiler terdapat kombinasi sistem yang berfungsi memindahkan energi panas hasil pembakaran ke fluida kerja, seperti peralatan *super heater*, *reheater*, *economizer*, dan *evaporator*.

Berdasarkan Standard ASME PTC 41, terdapat 2 metode untuk menghitung efisiensi *boiler* yaitu metode *direct* dan metode *indirect*.

Metode *direct* atau *input-output* adalah metode yang menggunakan perbandingan besar energi panas yang keluar dengan energi panas yang masuk kedalam boiler. Besar energi yang masuk berasal dari nilai kalori batu bara dan jumlah bahan bakar, nilai kalori dapat dicari dengan mengambil beberapa sampel batubara kemudian melakukan penelitian di laboratorium. Sedangkan, besar energi yang keluar berasal dari jumlah *steam* yang dihasilkan, enthalpi *steam* dan *feed water*.

$$\eta = \frac{\text{Heat Output}}{\text{Heat Input}} \times 100\% \quad (2.5)$$

$$\eta = \frac{Q_{\text{economizer}} + Q_{\text{evaporator}} + Q_{\text{superheater}}}{Q_{\text{masuk}}} \times 100\% \quad (2.6)$$

Kelebihan Metode *Direct* [kumar,2013] :

1. Dapat melakukan perhitungan efisiensi boiler dengan cepat
2. Dibutuhkan beberapa instrument untuk melakukan monitoring pada bagian tertentu

Kekurangan Metode *Direct* [kumar,2013] :

1. Tidak dijelaskan faktor yang mempengaruhi efisiensi
2. Tidak dihitung macam-macam *heat losses*

Metode *indirect* adalah metode yang menggunakan selisih antara besar energi *input* dan *losses*. Metode ini biasanya disebut metode *heat losses* [4]. Dalam menggunakan metode *indirect*, data yang dibutuhkan berupa *coal fired boiler* dan *fuel analysis*.

Pada data *Coal fired boiler* terdapat jumlah bahan bakar yang masuk tiap jam, jumlah *steam* tiap jam, tekanan dan suhu *steam output*, suhu *feed water*, kandungan kadar CO<sub>2</sub> dan CO, suhu gas buang, suhu lingkungan, kelembapan udara lingkungan, suhu permukaan boiler, kecepatan angin disekitar boiler, total luas permukaan boiler, nilai GCV *bottom ash* dan *fly ash*.

Pada data *Fuel analysis* terdapat data kadar abu, karbon, hidrogen, nitrogen, oksigen, sulfur, dan nilai HHV dari batubara.

Pada standar ASME PTC 41, Ada 8 *heat losses* yang terdapat dalam boiler seperti pada :

- ***Heat loss due to dry flue gas (L1)***

$$L1 = \frac{m * Cp * (Tf - Ta)}{HHV} * 100 \quad (2.7)$$

Dimana,

m	= Massa dari gas buang kering	(kg/kg fuel)
Cp	= Kalor spesifik dari gas buang kering	(kCal/kg)
HHV	= Nilai kalor batubara	(kCal/kg)
Tf	= Temperature gas buang	( <sup>0</sup> C)
Ta	= Temperature ambient	( <sup>0</sup> C)

• ***Heat loss due to H<sub>2</sub> in fuel (L2)***

$$L2 = \frac{9 * H2 * (584 + Cp(Tf - Ta))}{HHV} * 100 \quad (2.8)$$

Dimana,

H <sub>2</sub>	= Jumlah atom hydrogen dalam bahan bakar	(kg/kg fuel)
Cp	= Kalor spesifik dari superheated steam	(kCal/kg <sup>0</sup> C)
584	= Panas latent yang berhubungan dengan tekanan parsial dari uap air	(kCal/kg)

• ***Heat loss due to moisture in fuel (L3)***

$$L3 = \frac{M * (584 + Cp(Tf - Ta))}{HHV} * 100 \quad (2.9)$$

Dimana,

M	= Kelembapan dalam bahan bakar	(kg/kg fuel)
---	--------------------------------	--------------

• ***Heat loss due to moisture in air (L4)***

$$L4 = \frac{AAS * humidity\ factor * Cp(Tf - Ta))}{HHV} * 100 \quad (2.10)$$

Dimana,

AAS	= Massa aktual udara	(kg/kg fuel)
-----	----------------------	--------------

- **Heat loss due to incomplete combustion (L5)**

$$L5 = \frac{\%CO * C * 5654}{(\%CO + \%CO_2) * HHV} * 100 \quad (2.11)$$

Dimana,

CO = Volume CO dalam gas buang (%)  
 CO<sub>2</sub> = Volume aktual CO<sub>2</sub> dalam gas buang (%)  
 C = Kadar karbon (kg/kg fuel)

- **Heat loss due to radiation and convection (L6)**

$$L6 = 0,548 * \left[ \left( \frac{T_s}{55,55} \right)^4 - \left( \frac{T_a}{55,55} \right)^4 \right] + 1,957 * (T_s - T_a)^{1,25} \\ * \sqrt{[(196,85 * V_m + 68,9)/68,9]} \quad (2.12)$$

Dimana,

V<sub>m</sub> = Kecepatan angin (m/s)  
 T<sub>s</sub> = Temperature permukaan (K)  
 T<sub>a</sub> = Temperature ambient (K)

- **Heat loss due unburnt in fly ash (L7)**

$$L7 = \frac{Total\ fly\ ash * GCV\ fly\ ash}{Total\ fuel\ burnt * GCV} * 100 \quad (2.13)$$

- **Heat loss due unburnt in bottom ash (L8)**

$$L8 = \frac{Total\ bottom\ ash * GCV\ bottom\ ash}{Total\ fuel\ burnt * HHV} * 100 \quad (2.14)$$

Efisiensi boiler didapat dengan mengurangi 100 dengan seluruh losses

$$\eta_{boiler} = 100 - (L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 + L8) \quad (2.15)$$

Berdasarkan analisa keseimbangan massa dan energi, menghitung jumlah panas yang masuk menggunakan persamaan :

$$\dot{Q}_{in} = HHV * \text{Banyak Batubara} \quad (2.16)$$

Persamaan unjuk kerja *boiler* yaitu dengan menghitung *mass flow* yang masuk ke *boiler* dan selisih entalphy *output-input* dari *boiler* [4]:

$$\dot{W}_{boiler} = \dot{m}_1 * (h_7 - h_1) \quad (2.17)$$

Selain itu, persamaan untuk mengetahui unjuk kerja boiler dapat menambahkan jumlah panas yang diterima masing-masing peralatan.

$$\dot{W}_{boiler} = \dot{Q}_{economizer} + \dot{Q}_{evaporator} + \dot{Q}_{superheater} \quad (2.18)$$

$$\dot{Q}_{economizer} = \dot{m}_1 * (h_2 - h_1) \quad (2.19)$$

$$\dot{Q}_{evaporator} = \dot{m}_4 * (h_5 - h_4) \quad (2.20)$$

$$\dot{Q}_{superheater} = \dot{m}_6 * (h_7 - h_6) \quad (2.21)$$

Dimana :

$\dot{Q}_{in}$	: Panas masuk	(kW)
$\dot{W}_{in}$	: Unjuk kerja boiler	(kW)
$\dot{m}_1$	: Laju aliran massa ke <i>economizer</i>	(kg/s)
$\dot{m}_4$	: Laju aliran massa ke evaporator	(kg/s)
$\dot{m}_6$	: Laju aliran massa ke <i>superheater</i>	(kg/s)
$h_1$	: Enthalpy masuk pada <i>economizer</i>	(kJ/kg)
$h_2$	: Enthalpy keluar pada <i>economizer</i>	(kJ/kg)
$h_4$	: Enthalpy masuk pada evaporator	(kJ/kg)
$h_5$	: Enthalpy keluar pada evaporator	(kJ/kg)
$h_6$	: Enthalpy masuk pada <i>superheater</i>	(kJ/kg)
$h_7$	: Enthalpy keluar pada <i>superheater</i>	(kJ/kg)

### 2.6.2 Turbin Uap

Turbin uap merupakan mesin panas yang dapat mengkonversi energi panas menjadi energi mekanik. Turbin uap di industri mempunyai 3 bagian tingkatan dengan satu poros, *High Pressure (HP)*, *Intermediate Pressure (IP)* dan *Low Pressure (LP)*.

Berdasarkan hukum keseimbangan massa dan energi, turbin uap mempunyai unjuk kerja yang dipengaruhi oleh jumlah massa yang masuk per satuan waktu dan selisih entalpi *input-output*. Unjuk kerja turbin dapat dibuat dalam model matematika seperti [4]:

Persamaan pada *high pressure* turbin :

$$\dot{W}_{HP} = \dot{m}_7 * (h_8 - h_7) \quad (2.22)$$

Persamaan pada *intermediate pressure* turbin :

$$\dot{W}_{IP} = \dot{m}_9 * (h_9 - h_{10}) \quad (2.23)$$

Persamaan pada *low pressure* turbin :

$$\dot{W}_{LP} = \dot{m}_{10} * (h_{10} - h_{11}) \quad (2.24)$$

Berdasarkan persamaan matematis tiap bagian turbin, kemudian setiap unjuk kerja tiap turbin ditambah sehingga didapat unjuk kerja total turbin.

$$\dot{W}_T = \dot{W}_{HP} + \dot{W}_{IP} + \dot{W}_{LP} \quad (2.25)$$

Dimana :

$\dot{W}_T$	: Kerja yang dihasilkan turbin	(kW)
$\dot{m}_7$	: Laju aliran massa ke HP turbin	(kg/s)
$\dot{m}_9$	: Laju aliran massa ke IP turbin	(kg/s)
$\dot{m}_{10}$	: Laju aliran massa ke LP turbin	(kg/s)
$h_8$	: Enthalpy masuk pada HP turbin	(kJ/kg)
$h_7$	: Enthalpy keluar pada HP turbin	(kJ/kg)
$h_9$	: Enthalpy masuk pada IP turbin	(kJ/kg)
$h_{10}$	: Enthalpy keluar pada IP turbin	(kJ/kg)
	atau input LP turbin	(kJ/kg)
$h_{11}$	: Enthalpy keluar pada LP turbin	(kJ/kg)

Setelah mengetahui unjuk kerja turbin uap, maka langkah selanjutnya yaitu menentukan nilai efisiensi dari turbin uap dapat menggunakan persamaan :

$$\eta = \frac{h \text{ input actual} - h \text{ output actual}}{h \text{ input actual} - h \text{ output isentropik}} * 100\% \quad (2.26)$$

Selanjutnya yaitu menentukan nilai efisiensi dari generator dapat menggunakan persamaan :

$$\eta_{\text{generator}} = \frac{\text{Daya yang Dihasilkan}}{\text{Unjuk kerja turbin uap}} \quad (2.27)$$

### 2.6.3 Pompa

Pompa adalah peralatan yang berfungsi memindahkan air dari sumber ke tempat yang diinginkan melalui pipa. Pompa dalam PLTU seperti : *Condensate Extraction Pump* (CEP), *Turbine Feed Water Pump* (TFWP) dan *Boiler Feed Water Pump* (BFWP).

*Condensate Extraction Pump* (CEP) adalah pompa yang berfungsi memompa air hasil pendinginan dari kondenser menuju ke *feed water storage tank*.

*Turbine Feed Water Pump* (TFWP) adalah pompa yang beroperasi dari *feed water storage tank* menuju ke *steam drum*, karena membutuhkan energi yang besar dalam melakukan kerja maka pompa ini menggunakan *steam* dalam melakukan kerja dengan memutar turbin. *Steam* yang digunakan dalam memutar memanfaatkan ekstraksi dari IP turbin.

*Boiler Water Circulation Pumps* (BFWP) adalah pompa yang berfungsi memindahkan air dari *steam drum* menuju ke *evaporator*.

Untuk menghitung unjuk kerja pompa dapat menggunakan selisih enthalpy *output – input* dan laju aliran massa yang melalui pompa. Nilai enthalpy didapatkan dari tabel termodinamika A-5.

- Unjuk Kerja CEP

$$\dot{W}_{pCEP} = \dot{m}_{13} * (h_{13} - h_{12}) \quad (2.28)$$

- Unjuk Kerja TFWP

$$\dot{W}_{pTFWP} = \dot{m}_{14} * (h_{15} - h_{14}) \quad (2.29)$$

- Unjuk Kerja BWCP

$$\dot{W}_{pBWCP} = \dot{m}_{15} * (h_{17} - h_{16}) \quad (2.30)$$

$$\dot{W}_{P total} = \dot{W}_{pCEP} + \dot{W}_{pTFWP} + \dot{W}_{pBWCP} \quad (2.31)$$

Dimana :

$\dot{W}_{P total}$	: Kerja yang dibutuhkan pompa	(kW)
$\dot{m}_{13}$	: Laju aliran massa ke CEP	(kg/s)
$\dot{m}_{14}$	: Laju aliran massa ke TFWP	(kg/s)
$\dot{m}_{15}$	: Laju aliran massa ke BWCP	(kg/s)
$h_{12}$	: Enthalpy masuk pada CEP	(kJ/kg)
$h_{13}$	: Enthalpy keluar pada CEP	(kJ/kg)
$h_{14}$	: Enthalpy masuk pada TFWP	(kJ/kg)
$h_{15}$	: Enthalpy keluar pada TFWP	(kJ/kg)
$h_{16}$	: Enthalpy masuk pada BWCP	(kJ/kg)
$h_{17}$	: Enthalpy keluar pada BWCP	(kJ/kg)

Dalam menentukan nilai efisiensi dari pompa dapat menggunakan persamaan :

$$\eta_{pompa} = \frac{h_{output isentropik} - h_{input actual}}{h_{output actual} - h_{input actual}} * 100\% \quad (2.32)$$

#### 2.6.4 Kondenser

Kondenser merupakan sebuah komponen yang berfungsi sebagai pendingin dalam siklus rankine. *Steam* yang keluar dari LP turbin akan mengalami perpindahan panas sehingga berubah menjadi air. Energi pendinginan didapat dari air laut yang masuk ke pipa – pipa kondenser. Sehingga dapat ditentukan besarnya energi panas yang keluar melalui air laut dengan mengetahui laju aliran massa dan selisih entalphy *input-output* [4]

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_{11}(h_{11} - h_{12}) \quad (2.33)$$

Dimana :

$\dot{Q}_{out}$	: Laju Perpindahan panas ke fluida pendingin	(kW)
$\dot{m}_{11}$	: Laju aliran massa dari fluida kerja	(kg/s)



- h 11 : Enthalpy pada kondisi 4 (input kondenser) (kJ/kg)  
 h 12 : Enthalpy pada kondisi 5 (output kondenser) (kJ/kg)

Selain itu, terdapat juga hubungan antara daya siklus yang dihasilkan, panas yang masuk dan panas yang keluar .

$$\dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{in} - \dot{W}_{siklus} \quad (2.34)$$

## 2.7 Efisiensi Sistem

Efisiensi sistem merupakan perbandingan besar daya yang dihasilkan dengan besar daya yang dibutuhkan dalam proses pembakaran. Di dalam pembangkit listrik tenaga uap, efisiensi sistem dipengaruhi oleh 3 komponen utama, yaitu daya turbin, daya pompa, dan panas masuk dari boiler.

$$\eta = \frac{\dot{W}_t - \dot{W}_p}{\dot{Q}_{in}} \times 100\% \quad (2.35)$$

Dimana :

- $\eta$  : Efisiensi thermal siklus rankine (%)  
 $\dot{W}_T$  : Unjuk kerja turbin (kW)  
 $\dot{W}_p$  : Unjuk kerja pompa (kW)  
 $\dot{Q}_{in}$  : Laju kalor yang masuk (kW)

## 2.8 Software HYSYS

HYSYS (*Hyphothetical System*) merupakan sebuah software yang dapat melakukan simulasi proses didalam suatu *plant*. Proses yang berlangsung mulai dari bahan mentah hingga produk yang akan dihasilkan. Dalam melakukan simulasi, yang harus dibuat yaitu jenis bahan yang akan digunakan, *process flow diagram* (PFD), menghitung keseimbangan massa dan energi. HYSYS juga dapat berfungsi menghitung kinerja suatu peralatan yang ada di *plant*. HYSYS mempunyai kelebihan seperti tampilan yang interaktif dan mudah dalam memasukkan data [5].

Dalam penelitian tugas akhir, *software* ini bertujuan mengetahui proses dari jumlah massa dan energi yang dibutuhkan dari fase air sampai menjadi *steam*. Dalam menentukan proses

yang terjadi pada sistem, maka langkah yang harus dibuat yakni membuat PFD sistem, dan menentukan laju aliran massa. Nilai aliran massa yang masuk harus sama dengan keluar.

## **BAB III METODOLOGI**

### **3.1 Tahap Penelitian**

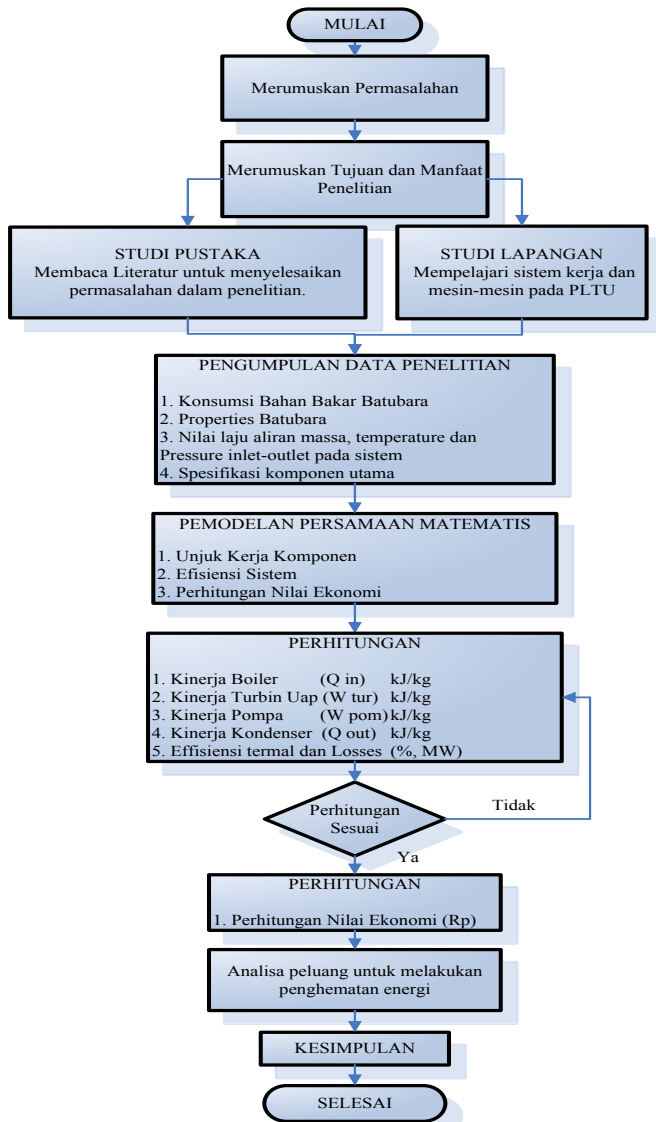
Penelitian tugas akhir dengan tema audit energi pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), terdapat 3 tahap dalam melakukan audit energi :

Tahap pertama adalah melakukan identifikasi masalah yang didalamnya terdapat berbagai masalah yang dapat diselesaikan dengan disiplin ilmu yang dipahami, kemudian dari berbagai permasalahan yang ada dirumuskan menjadi rumusan masalah, setelah rumusan masalah didapat kemudian menentukan tujuan dan manfaat dari penelitian. Selain itu, juga perlu melakukan studi pustaka dari berbagai teori penunjang dan beberapa penelitian sebelumnya. Tentunya, tidak hanya studi pustaka yang perlu dipelajari tetapi juga melakukan studi tentang proses produksi listrik pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan melakukan studi lapangan selama 2 minggu di PT. Jawa Power Unit 5 Situbondo.

Tahap kedua adalah melakukan pengambilan dan pengolahan data. Data – data yang diperlukan dapat diambil dari berbagai sumber yang terpercaya seperti dari hasil wawancara dengan ketua *plant performance* dan *operation* wawancara ini bertujuan untuk menemukan daerah yang sering terjadi pemborosan energi, data sekunder dari *logger* yang ada di *Central Control Room* (CCR) yang berisi tentang *mass flow*, *pressure* dan *temperature* dari masing - masing *input – output* setiap peralatan utama, seperti : *boiler*, turbin uap, kondenser dan pompa. Data ini digunakan untuk mengetahui besar unjuk kerja *boiler*, turbin uap, kondenser, pompa dan menghitung efisiensi sistem. Selain itu, menghitung unjuk kerja setiap komponen membutuhkan *mass flow* dan *enthalpy*. *Enthalpy* didapatkan dari tabel termodinamika dimana hanya membutuhkan 2 parameter utama dalam mencari *enthalpy* yaitu data *pressure* dan *temperature*.

Setelah perhitungan unjuk kerja dan efisiensi sistem, dapat diidentifikasi komponen yang mengalami pemborosan energi.

Tahap ketiga adalah melakukan analisa dengan menggunakan neraca keseimbangan massa dan energi yang kemudian di representasikan dengan menggunakan diagram sankey dan mengevaluasi perhitungan efisiensi sistem yang telah dilakukan akan dibandingkan dengan efisiensi sistem yang ada pada kondisi operasional dan membuat beberapa rekomendasi. Rekomendasi dapat berupa teknis dan non teknis. Dari segi teknis, melakukan penghematan biaya produksi dengan melakukan sebuah simulasi menggunakan *software* dengan tujuan dapat meningkatkan efisiensi sistem, kemudian melakukan perhitungan ekonomi dengan menambahkan komponen yang sudah dilakukan pada *software*. Dari segi non teknis, melakukan perawatan komponen secara berkala. Selanjutnya, membuat kesimpulan dan saran dari penelitian yang sudah dilakukan. Kesimpulan dan saran ditunjukkan kepada PT. Jawa Power Unit 5 Situbondo untuk mengembangkan perusahaan.



**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian

### 3.2 Spesifikasi Komponen

Pada pembangkit listrik tenaga uap PT. Jawa Power unit 5, mempunyai beberapa peralatan utama dalam melakukan kerja, seperti boiler, turbin, pompa

**Tabel 3.1** Spesifikasi Boiler

<b>SPESIFIKASI KOMPONEN</b>	
Jenis Komponen	Boiler
<i>Design load</i>	100% ( 650MW ), 75% (487MW), 50% ( 325 MW )
<i>Manufacturer</i>	ABB CE
<i>Model</i>	<i>Outdoor, Forced Circulation, and Balanced Draft Pulverizer Coal Fired, Tangential Firing &amp; Low NO<sub>x</sub></i>
<i>Number of Burners</i>	<i>Coal 24 per unit, 4 corner fired Oil 12 per unit, 4 corner fired</i>
<i>Mills Capacity</i>	6 x 66 T/h
<i>Feeders Capacity</i>	6 x 89 T/h
<i>Firing System</i>	<i>Tilting Tangential, Low NO<sub>x</sub> Pulverized Coal Burners</i>

**Tabel 3.2** Spesifikasi Turbin Uap

<b>SPESIFIKASI KOMPONEN</b>	
Jenis Komponen	Turbin
<i>Design load</i>	100% ( 650MW ),50% ( 325 MW )
<i>Manufacturer</i>	SIEMENS
<i>Turbine Type</i>	HMN Series 4 ( 1 HP, 1 IP , 2 LP )
<i>Rated Speed</i>	3000 rpm

<i>HP Turbine</i>	<i>Single Flow, Double Shell, 14 stages Barrel Type outer Casing2 Combined Stop &amp; Control Valves</i>
<i>IP Turbine</i>	<i>Double Flow, Double Shell Casing, 2x13 stages 2 combined stop &amp; control valves</i>
<i>LP Turbine (2 Off)</i>	<i>Double Flow, Multi Shell Casing, 2x7stages</i>

**Tabel 3.3** Spesifikasi Pompa

SPESIFIKASI KOMPONEN	
Jenis Komponen	Pompa
<i>Condensate pump</i>	<i>3 x 50%, Axial Centrifugal</i>
<i>Manufacturer</i>	SIEMENS
<i>Total flow rate</i>	436.3 kg/s
<i>Boiler Feed Water Pump</i>	<i>2 x 60% steam turbine driven, 1 x 40% electric motor driven</i>
<i>Turbine Drive</i>	<i>Rated speed : 5750 rpm</i> <i>Steam pressure : 11.26 / 44 Bar</i> <i>Steam temp : 358.2 / 333.3 °C</i> <i>Stages : 22</i> <i>Exhaust steam : 0.0744 bar (abs)</i> <i>Steam flow : 10.2/10.6 Kg/s</i>

### 3.3 Tahap Perhitungan Unjuk Kerja Komponen

Pada tahap perhitungan unjuk kerja komponen dibutuhkan *mass flow* dan *enthalpy*. *Enthalpy* dapat didapatkan dari 2 parameter yaitu tekanan dan temperatur kemudian menggunakan

bantuan dari tabel thermodinamika untuk mendapatkan nilai entalpi yang masuk dan keluar.

### 3.4. Panas Masuk

Berdasarkan persamaan 2.16 menghitung besar panas yang masuk dengan nilai asumsi HHV = 4200 kCal/kg atau sama dengan 17.694,81 kJ/kg.

#### 3.4.1 Panas Masuk Operasional

Pada kondisi operasional dengan beban 100% *full load* jumlah panas yang masuk dapat menggunakan persamaan 2.16 :

$$\begin{aligned}
 Q_{in} &= HHV * \text{Banyak BB} \\
 Q_{in} &= 17.694,81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 335.895 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \\
 Q_{in} &= 5.943.599.560,3 \frac{\text{kJ}}{\text{jam}} \\
 Q_{in} &= 1.650.999,87 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \\
 Q_{in} &= 1.650.999,87 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

#### 3.4.2 Panas Masuk Aktual

Pada kondisi aktual dengan beban 100% *full load* jumlah panas yang masuk ke boiler dapat menggunakan persamaan 2.16 :

$$\begin{aligned}
 Q_{in} &= HHV * \text{Banyak BB} \\
 Q_{in} &= 17.694,81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 394.601 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \\
 Q_{in} &= 6.982.406.980,09 \frac{\text{kJ}}{\text{jam}} \\
 Q_{in} &= 1.939.557,49 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \\
 Q_{in} &= 1.939.557,49 \text{ kW}
 \end{aligned}$$



### 3.5 Unjuk Kerja Boiler

Langkah pertama, untuk mendapatkan nilai *enthalpy feed water* ( $h_1$ ) yang masuk ke *boiler* menggunakan tabel termodinamika A-5, karena pada tabel A-5 fluida yang bekerja masih dalam fase cair. Sedangkan, untuk memperoleh nilai *enthalpy steam* ( $h_7$ ) yang keluar dari *boiler* menggunakan tabel termodinamika A-4 karena pada tabel A-4 fluida yang bekerja dalam fase uap.

Dalam melakukan perhitungan dengan tabel A-4 dan A-5, data suhu dan tekanan pada kondisi aktual tidak ada pada tabel A-4 dan A-5 sehingga diperlukan perhitungan interpolasi untuk mendapatkan *enthalpy*.

#### 3.5.1 Unjuk Kerja Boiler Operasional

Pada data operasional dengan beban 100% *full load* didapatkan nilai *input boiler* :

**Tabel 3.4** *Input Boiler 100% full load*

Pressure	200	Bar
Temperature	278	°C
Mass Flow	546,122	Kg/s

Perhitungan nilai *enthalpy* dengan nilai temperatur 278°C menggunakan perhitungan interpolasi dengan menggunakan tabel A-5.

$$\frac{T - T_1}{T_2 - T_1} = \frac{h - h_1}{h_2 - h_1} \quad (3.1)$$

$$\frac{278 - 260}{300 - 260} = \frac{h - 1133,5}{1333,3 - 1133,5}$$

$$\frac{18}{40} = \frac{h - 1133,5}{199,8}$$

$$h_1 = 1223,41 \text{ Kj/Kg}$$

Pada data operasional dengan beban 100% *full load* didapatkan nilai *output boiler* :

**Tabel 3.5** *Output Boiler 100% full load*

Pressure	167	Bar
Temperature	538	°C
Mass Flow	546,122	Kg/s

Perhitungan nilai enthalpy pada temperatur 520 °C pada tekanan 167 bar menggunakan perhitungan interpolasi dengan menggunakan tabel A-4.

$$\frac{P - P_1}{P_2 - P_1} = \frac{h - h_1}{h_2 - h_1} \quad (3.2)$$

$$\frac{167 - 160}{180 - 160} = \frac{h - 3353,3}{3377,8 - 3353,3}$$

$$\frac{7}{20} = \frac{h - 3353,3}{24,5}$$

$$h = 3361,875 \text{ Kj/Kg}$$

Perhitungan nilai enthalpy pada temperature 560 °C pada tekanan 167 bar menggunakan perhitungan interpolasi dengan menggunakan persamaan 3.2 dengan tabel A-4.

$$\frac{167 - 160}{180 - 160} = \frac{h - 3465,4}{3444,4 - 3465,4}$$

$$h = 3458,05 \text{ Kj/Kg}$$

**Tabel 3.6** Interpolasi Temperatur 538 °C

P = 167 BAR				
			H	
T	520	°C	3361,875	Kj/Kg
T	560	°C	3458,05	Kj/Kg

Perhitungan nilai enthalpy pada temperature 538 °C menggunakan perhitungan interpolasi dengan menggunakan persamaan 3.1 dengan tabel A-4.

$$\frac{538 - 520}{560 - 520} = \frac{h - 3361,875}{3458,05 - 3361,875}$$

$$h = 3405,153 \text{ Kj/Kg}$$

Langkah kedua, berdasarkan persamaan 2.17 menghitung unjuk kerja boiler dengan mengkalikan *mass flow* yang masuk ke *boiler* dan selisih entalphy *output-input*, sehingga unjuk kerja boiler diketahui.

$$\dot{W} \text{ boiler} = 546,122 * (3405,153 - 1223,41)$$

$$\dot{W} \text{ boiler} = 1.191.498,26 \text{ kW}$$

### 3.5.2 Unjuk Kerja Boiler Aktual

Perhitungan unjuk kerja boiler aktual, didapatkan pada kondisi aktual beban 100% *full load*. Data yang didapat berasal dari CCR unit 5.

**Tabel 3.7** Data Economizer

P in economizer	186,81	Bar
T in economizer	278,96	°C
H in economizer	1.226,40	kJ/kg
P out economizer	181,23	Bar
T out economizer	349,88	°C
H out economizer	1.656,70	kJ/kg
Mass Flow	602,50	Kg/s

Berdasarkan persamaan 2.19 menentukan panas yang masuk kedalam economizer yaitu :

$$\dot{Q} \text{ economizer} = \dot{m} * (h_{11} - h_{12})$$

$$\dot{Q} \text{ economizer} = 602,505 * (1656,7 - 1226,4)$$

$$\dot{Q} \text{ economizer} = 259.257,90 \text{ kW}$$

**Tabel 3.8** Data Evaporator

P in evaporator	183,46	Bar
T in evaporator	349,88	<sup>0</sup> C
H in evaporator	1.655,10	kJ/kg
P out evaporator	178,56	Bar
T out evaporator	380,00	<sup>0</sup> C
H out evaporator	2.771,50	kJ/kg
Mass Flow	580,60	Kg/s

Berdasarkan persamaan 2.20 menentukan panas yang masuk kedalam evaporator yaitu :

$$\dot{Q}_{\text{evaporator}} = 580,60 * (2771,5 - 1655,1)$$

$$\dot{Q}_{\text{evaporator}} = 648.181,84 \text{ kW}$$

**Tabel 3.9** Data Superheater

P in superheater	175,64	Bar
T in superheater	380,00	<sup>0</sup> C
H in superheater	2.784,60	kJ/kg
P out superheater	168,82	Bar
T out superheater	515,95	<sup>0</sup> C
H out superheater	3.332,80	kJ/kg
Mass Flow	580,60	Kg/s

Berdasarkan persamaan 2.21 menentukan panas yang masuk kedalam superheater yaitu :

$$\dot{Q}_{\text{superheater}} = 580,608 * (3332,8 - 2784,6)$$

$$\dot{Q}_{\text{superheater}} = 318.284,92 \text{ kW}$$

Berdasarkan persamaan 2.18 menentukan unjuk kerja boiler yaitu :

$$\dot{W}_{\text{boiler}} = \dot{Q}_{\text{economizer}} + \dot{Q}_{\text{evaporator}} + \dot{Q}_{\text{superheater}}$$

$$\dot{W}_{\text{boiler}} = 259.257,9 + 648.181,84 + 318.284,92$$

$$\dot{W}_{\text{boiler}} = 1.225.724,66 \text{ kW}$$

### 3.5.3 Menghitung Efisiensi Boiler

Pada penelitian tugas akhir ini menggunakan metode *direct* dan *indirect*. Perhitungan efisiensi dengan menggunakan metode *direct* dengan persamaan 2.6

$$\eta_{\text{boiler}} = \frac{\dot{Q}_{\text{economizer}} + \dot{Q}_{\text{evaporator}} + \dot{Q}_{\text{superheater}}}{\dot{Q}_{\text{masuk}}} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{boiler}} = \frac{1.225.724,66}{1.939.557,49} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{boiler}} = 63,19\%$$

Pada penelitian tugas akhir ini menggunakan metode *indirect* dengan menggunakan persamaan 2.15

**Tabel 3.10** Data Coal Fired Boiler

<b>Coal Fired Boiler</b>			
<i>Fuel Firing Rate</i>	=	394.601,00	kg/hr
<i>Steam Generation Rate</i>	=	2.108.188,80	kg/hr
<i>Steam Pressure</i>	=	179,1528	kg/cm2 (g)
<i>Steam Temperature</i>	=	515,95	°C
<i>Feed Water Temperature</i>	=	278,96	°C
<i>%CO2 in Flue Gas</i>	=	14,3	%
<i>%CO in Flue Gas</i>	=	0,5	%
<i>Flue Gas Temperature</i>	=	418	°C
<i>Ambient Temperature</i>	=	42	°C
<i>Humidity in Ambient Air</i>	=	0,017	kg/kg dry air
<i>Surface Temperature</i>	=	70	°C
<i>Wind Velocity</i>	=	3,5	m/s
<i>Total surface of boiler</i>	=	90	m2
<i>HHV of Bottom Ash</i>	=	2.375,52	kCal/kg
<i>HHV of Fly Ash</i>	=	88,20	kCal/kg
<i>Ratio Bottom to Fly Ash</i>	=	646:24:00	

Pada *Fuel Analysis* terdiri dari data kadar abu, karbon, hidrogen, nitrogen, oksigen, sulfur, dan nilai HHV dari batubara.

**Tabel 3.11** Data *Fuel Analysis*

<b><i>Fuel Analysis</i></b>			
Ash	=	3,1	%
Moisture	=	21	%
Carbon	=	56,56	%
Hydrogen	=	4,48	%
Nitrogen	=	0,76	%
Oxygen	=	13,95	%
Sulphur	=	0,15	%
HHV	=	4.200,00	kCal/kg
Total	=	100	%

Berdasarkan data dari *Coal fired Boiler* dan *Fuel Analysis* didapatkan nilai efisiensi boiler dengan menggunakan persamaan 2.7 sampai dengan 2.15.

Berikut ini hasil perhitungan menggunakan metode *indirect*  
Didapatkan hasil

**Tabel 3.12** *Summary of Heat Coal Fired Boiler*

<b><i>Summary of Heat Balance for Coal Fired Boiler</i></b>			
<b><i>Input / Output Parameter</i></b>		<b><i>kCal/kg of Coal</i></b>	<b><i>% Losses</i></b>
<i>Heat Input</i>	=	4.200,00	100%
<i>Losses In Boiler</i>			
<i>1. Dry flue gas, L1</i>	=	905,53	21,56%
<i>2. Loss due to hydrogen in fuel, L2</i>	=	300,66	7,16%
<i>3. Loss due to moisture in fuel, L3</i>	=	166,29	3,73%
<i>4. Loss due to moisture in air, L4</i>	=	26,61	0,63%
<i>5. Partial combustion of C to CO, L5</i>	=	108,04	2,57%
<i>6. Surface heat losses, L6</i>	=	0,13	0,0037%
<i>7. Loss due to unburnt in fly ash, L7</i>	=	0,16	0,0065%
<i>8. Loss due to Unburnt bottom ash, L8</i>	=	38,48	1,58%
<b><i>Boiler Efficiency</i></b>	=	<b>62,75%</b>	

Besar *heat losses* pada boiler dengan menggunakan metode *direct* yaitu

$$\text{heat losses} = (100\% - 63,19\%) * 1.939.557,49$$

$$\text{heat losses} = 713.951,11 \text{ kW}$$

### 3.6. Unjuk Kerja Turbin Uap

Menghitung unjuk kerja turbin uap, membutuhkan beberapa data seperti *mass flow* yang masuk ke turbin uap dan selisih enthalpy *input-output*. Berdasarkan persamaan 2.25 unjuk kerja turbin uap dapat diketahui dengan menambahkan setiap unjuk kerja turbin (HP, IP, dan LP turbin).

#### 3.6.1 Perhitungan Unjuk Kerja Operasional Turbin Uap

Pada data operasional dengan beban 100% *full load* didapatkan nilai HP, IP dan LP Turbin :

**Tabel 3.13** Data Operasional HP turbin 100% *Full Load*

P in	167,00	Bar
T in	538,00	°C
H in	3.396,90	kJ/kg
P out	42,72	Bar
T out	332,20	°C
H out	3.042,50	kJ/kg
Mass Flow	546,12	Kg/s

Perhitungan unjuk kerja pada HP turbin menggunakan persamaan 2.22:

$$W_{HP} = 546,122(3396,9 - 3042,5)$$

$$W_{HP} = 193.545,64 \text{ kW}$$

**Tabel 3.14** Data Operasional IP turbin 100% *Full Load*

P in	38,83	Bar
T in	538,00	°C
H in	3.532,40	kJ/kg
P out	5,62	Bar
T out	266,90	°C
H out	2.994,30	kJ/kg
Mass Flow	470,10	Kg/s



Perhitungan unjuk kerja pada IP turbin menggunakan persamaan 2.23:

$$W_{IP} = 470,105(3532,4 - 2994,3)$$

$$W_{IP} = 252.963,5 \text{ kW}$$

**Tabel 3.15** Data Operasional LP turbin A 100% Full Load

P in	5,62	Bar
T in	266,90	°C
H in	2.994,30	kJ/kg
P out	0,0649	Bar
T out	37,59	°C
H out	2.329,6	kJ/kg
Mass Flow	193,01	Kg/s

Perhitungan unjuk kerja pada LP turbin menggunakan persamaan 2.24:

$$W_{LP A} = 193,01(2994,3 - 2329,6)$$

$$W_{LP A} = 128.299,4 \text{ kW}$$

**Tabel 3.16** Data Operasional LP turbin B 100% Full Load

P in	5,62	Bar
T in	266,90	°C
H in	2994,30	kJ/kg
P out	0,0841	Bar
T out	42,46	°C
H out	2.328,79	kJ/kg
Mass Flow	193,01	Kg/s

Perhitungan unjuk kerja pada LP turbin menggunakan persamaan 2.24:

$$W_{LP B} = 193,018(2994,3 - 2328,79)$$

$$W_{LP B} = 123.966,5 \text{ kW}$$

Berdasarkan persamaan 2.25 unjuk kerja turbin uap total :

$$W_{turbin \text{ total}} = W_{HP} + W_{IP} + W_{LPA} + W_{LPB}$$

$$W \text{ turbin total} = 193.545,64 + 253.729,77 + 128.299,4 + 123.966,5$$

$$W \text{ turbin total} = 698.784,04 \text{ kW}$$

### 3.6.2 Perhitungan Unjuk Kerja Aktual Turbin Uap

Langkah-langkah perhitungan pada unjuk kerja HP, IP dan LP turbin sama seperti boiler:

**Tabel 3.17** Data Aktual HP Turbin 100% Full Load

P in	168,82	Bar
T in	515,95	°C
H in	3.332,80	kJ/kg
P out	41,16	Bar
T out	316,95	°C
H out	3.004,70	kJ/kg
Mass Flow	580,60	Kg/s

Perhitungan unjuk kerja pada HP turbin menggunakan persamaan 2.22:

$$W_{HP} = 580,60(3332,8 - 3004,7)$$

$$W_{HP} = 190.494,86 \text{ kW}$$

**Tabel 3.18** Data Aktual IP Turbin 100% Full Load

P in	38,24	Bar
T in	528,68	°C
H in	3.513,20	kJ/kg
P out	5,44	Bar
T out	234,48	°C
H out	2.927,10	kJ/kg
Mass Flow	479,22	Kg/s

Perhitungan unjuk kerja pada IP turbin menggunakan persamaan 2.23:

$$W_{IP} = 479,22(3513,2 - 2927,1)$$

$$W_{IP} = 280.876,11 \text{ kW}$$

**Tabel 3.19** Data Aktual LP Turbin A 100% *Full Load*

P in	5,44	Bar
T in	234,48	°C
H in	2.927,10	kJ/kg
P out	0,083	Bar
T out	42,89	°C
H out	2.359,74	kJ/kg
Mass Flow	190,23	Kg/s

Perhitungan unjuk kerja pada LP turbin menggunakan persamaan 2.24:

$$W_{LP A} = 190,23(2927,1 - 2359,74)$$

$$W_{LP A} = 107.928,89 \text{ kW}$$

**Tabel 3.20** Data Aktual LP Turbin B 100% *Full Load*

P in	5,44	Bar
T in	234,48	°C
H in	2.927,10	kJ/kg
P out	0,066	Bar
T out	40,41	°C
H out	2.349,92	kJ/kg
Mass Flow	190,23	Kg/s

Perhitungan unjuk kerja pada LP turbin menggunakan persamaan 2.24:

$$W_{LP B} = 190,23(2927,1 - 2342,92)$$

$$W_{LP B} = 111.132,36 \text{ kW}$$

Berdasarkan persamaan 2.25 unjuk kerja turbin uap total :

$$W_{turbin total} = W_{HP} + W_{IP} + W_{LPA} + W_{LPB}$$

$$W_{turbin total} = 190.494,86 + 280.876,11 + 107.928,89 + 111.132,36$$

$$W_{turbin total} = 690.432,22 \text{ kW}$$

### 3.6.3 Efisiensi Aktual Turbin Uap

Melakukan perhitungan efisiensi turbin uap dengan menggunakan perhitungan efisiensi isentropis [4]:

- High Pressure Turbin (HP) =  $\frac{W_{actual}}{W_{ideal}} \cdot 100\%$

$$\eta \text{ HP Turbin} = \frac{(3332,8 - 3004,7)}{(3332,8 - 2948,2)} 100\%$$

$$\eta \text{ HP Turbin} = 85,30\%$$

Besar *heat losses* pada HP turbin dengan menggunakan persamaan 3.3 yaitu

$$W_{ideal} = \frac{W_{aktual}}{\eta \text{ HP}} \quad (3.3)$$

$$W_{ideal} = \frac{190.497,48 \text{ kW}}{85,30\%}$$

$$W_{ideal} = 223.326,47 \text{ kW}$$

$$\text{Heat Losses} = 223.326,47 - 190.497,48$$

$$\text{Heat Losses} = 32.828,99 \text{ kW} = 1,69 \% \text{ dari } Q_{in}$$

- $\eta \text{ Intermediate Pressure Turbin (IP)} = \frac{W_{aktual}}{W_{ideal}} 100\%$

$$\eta \text{ IP Turbin} = \frac{(3513,2 - 2989,1)}{(3513,2 - 2942,2)} 100\%$$

$$\eta \text{ IP Turbin} = \frac{524,1}{571} 100\%$$

$$\eta \text{ IP Turbin} = 91,78 \%$$

Besar *heat losses* pada IP turbin dengan menggunakan persamaan 3.3 yaitu

$$W_{ideal} = \frac{280.876,11 \text{ kW}}{91,78 \%}$$

$$W_{ideal} = 306.031,93 \text{ kW}$$

$$\text{Heat Losses} = 306.031,93 - 280.876,11$$

$$\text{Heat Losses} = 25.155,82 \text{ kW} = 1,30 \% \text{ dari } Q_{in}$$

- $\eta \text{ Low Pressure Turbin (LP) A} = \frac{W_{aktual}}{W_{ideal}} 100\%$

$$\eta \text{ LP Turbin A} = \frac{(2927,1 - 2359,74)}{(2927,1 - 2247,5)} 100\%$$

$$\eta \text{ LP Turbin A} = \frac{567,36}{679,6} 100\%$$

$$\eta \text{ LP Turbin A} = 83,48 \%$$

Besar *heat losses* pada LP turbin A dengan menggunakan persamaan 3.3 yaitu

$$W_{ideal} = \frac{107.928,89 \text{ kW}}{83,48 \%}$$

$$W_{ideal} = 129.287,12$$

$$Heat \text{ Losses} = 129.287,12 - 107.928,89$$

$$Heat \text{ Losses} = 21.358,23 \text{ kW} = 1,10 \% \text{ dari } Q \text{ in}$$

Besar *heat losses* pada LP turbin B dengan menggunakan persamaan 3.3 yaitu

- Low Pressure Turbin (LP) B =  $\frac{W_{actual}}{W_{ideal}} 100\%$

$$\eta \text{ LP Turbin B} = \frac{(2927,1 - 2342,92)}{(2927,1 - 2219,1)} 100\%$$

$$\eta \text{ LP Turbin B} = \frac{584,18}{708} 100\%$$

$$\eta \text{ LP Turbin B} = 82,51 \%$$

Besar *heat losses* pada LP turbin B dengan menggunakan persamaan 3.3 yaitu

$$W_{ideal} = \frac{111.132,36 \text{ kW}}{82,51 \%}$$

$$W_{ideal} = 134.689,56 \text{ kW}$$

$$Heat \text{ Losses} = 134.689,56 - 111.132,36$$

$$Heat \text{ Losses} = 23.557,20 \text{ kW} = 1,21 \% \text{ dari } Q \text{ in}$$

Besar efisiensi turbin uap total dengan mengkalikan seluruh efisiensi HP turbin, LP turbin, LP turbin A, dan LP turbin B

$$\eta \text{ Turbin Uap} = \eta \text{ HP} * \eta \text{ IP} * \eta \text{ LP A} * \eta \text{ LP B}$$

$$\eta \text{ Turbin Uap} = 85,30\% * 91,78\% * 83,48\% * 82,51\%$$

$$\eta \text{ Turbin Uap} = 53,92\%$$

### 3.6.4 Efisiensi Operasional Generator

Setelah mengetahui unjuk kerja turbin, maka kemudian menghitung nilai efisiensi operasional dari generator :

$$\eta_{generator} = \frac{\text{Daya output}}{\text{Daya Input}} * 100\% \quad (3.4)$$

$$\eta_{generator} = \frac{650.000 \text{ kW}}{698.775,05 \text{ kW}} * 100\%$$

$$\eta_{generator} = 93,01\%$$

### 3.6.5 Efisiensi Aktual Generator

Perhitungan aktual dengan menggunakan persamaan 3.4 didapatkan nilai efisiensi aktual generator:

$$\eta_{generator} = \frac{640.630 \text{ kW}}{690.432,22 \text{ kW}} * 100\%$$

$$\eta_{generator} = 92,78 \%$$

$$\text{Heat Losses} = 49.802,62 \text{ kW} = 2,57 \% \text{ dari } Q_{in}$$

## 3.7 Unjuk Kerja Pompa

Menghitung unjuk kerja pompa dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.31 dengan menjumlahkan semua pompa yang ada di PLTU seperti, *Condensate Extraction Pump* (CEP), *Turbin Feed Water Pump* (TFWP), dan *Boiler Water Circulation Pump* (BWCP).

### 3.7.1 Perhitungan Unjuk Kerja Operasional Pompa

Pada data operasional dengan beban 100% *full load* didapatkan nilai:

**Tabel 3.21** Data Operasional CEP 100% *Full Load*

P in	0,066	Bar
T in	37,90	°C
H in	158,80	kJ/kg
P out	26,37	Bar
T out	40	°C
H out	172	kJ/kg
Mass Flow	383,23	Kg/s

Perhitungan unjuk kerja pada CEP:

$$\dot{W}_{CEP} = \dot{m}_{13}(h_{13} - h_{12})$$

$$W_{CEP} = 383,23(172 - 167,78)$$

$$W_{CEP} = 1.617,23 \text{ kW}$$

**Tabel 3.22** Data Operasional TFWP 100% *Full Load*

P in	10,59	Bar
T in	182,4	°C
H in	773,8	kJ/kg
P out	203,2	Bar
T out	186,2	°C
H out	800,3	kJ/kg
Mass Flow	546,122	Kg/s

Perhitungan unjuk kerja pada TFWP :

$$\dot{W}_{TFWP} = \dot{m}_{14}(h_{15} - h_{14})$$

$$\dot{W}_{TFWP} = 546,122(800,3 - 773,8)$$

$$\dot{W}_{TFWP} = 14.472,23 \text{ kW}$$

Perhitungan unjuk kerja total pompa dengan menjumlahkan unjuk kerja CEP dan TFWP :

$$\dot{W}_{pompa} = W_{CEP} + W_{TFWP}$$

$$\dot{W}_{pompa} = 1.617,23 + 14.472,23$$

$$\dot{W}_{pompa} = 16.089,46 \text{ kW}$$

### 3.7.2 Perhitungan Unjuk Kerja Aktual Pompa

Perhitungan unjuk kerja CEP, TFWP, dan BWCP dengan menggunakan selisih enthalpy *output – input* dan laju aliran massa yang melalui pompa. Nilai enthalpy didapatkan dari tabel termodinamika A-5.

**Tabel 3.23** Data aktual CEP 100% *Full Load*

P in	0,083	Bar
T in	39,10	°C
H in	172,73	kJ/kg
P out	30,447	Bar
T out	40,60	°C
H out	176,77	kJ/kg
Mass Flow	572,764	Kg/s

Perhitungan unjuk kerja pada CEP:

$$\dot{W}_{CEP} = \dot{m}_{13}(h_{13} - h_{12})$$

$$\dot{W}_{CEP} = 427,24(176,77 - 172,73)$$

$$\dot{W}_{CEP} = 1.726,04 \text{ kW}$$

**Tabel 3.25** Data aktual TFWP 100% *Full Load*

P in	13,59	Bar
T in	189,51	°C
H in	805,44	kJ/kg
P out	200,22	Bar
T out	193,74	°C
H out	832,94	kJ/kg
Mass Flow	602,505	Kg/s

Perhitungan unjuk kerja pada TFWP :

$$\dot{W}_{TFWP} = \dot{m}_{14}(h_{15} - h_{14})$$

$$\dot{W}_{TFWP} = 602,505(832,94 - 805,44)$$

$$\dot{W}_{TFWP} = 16.568,88 \text{ kW}$$



**Tabel 3.26** Data aktual BWCP 100% Full Load

P in	181,233	Bar
T in	349,88	°C
H in	1658,3	kJ/kg
P out	187,26	Bar
T out	350,23	°C
H out	1656,7	kJ/kg
Mass Flow	580,608	Kg/s

Perhitungan unjuk kerja pada BWCP :

$$\dot{W}_{BWCP} = \dot{m}_{14}(h_{15} - h_{14})$$

$$\dot{W}_{BWCP} = 580,608(1658,3 - 1657,4)$$

$$\dot{W}_{BWCP} = 522,54 \text{ kW}$$

Perhitungan unjuk kerja total pompa dengan menjumlahkan unjuk kerja CEP, TFWP dan BWCP :

$$\dot{W}_{pompa} = \dot{W}_{CEP} + \dot{W}_{TFWP} + \dot{W}_{BWCP}$$

$$\dot{W}_{pompa} = 1.726,04 + 16.568,88 + 522,54$$

$$\dot{W}_{pompa} = 18.817,46 \text{ kW}$$

### 3.7.3 Perhitungan Efisiensi Pompa

Melakukan perhitungan dengan mencari nilai efisiensi pompa dengan menggunakan persamaan 2.33 yaitu :

$$\bullet \text{ Condensate Extraction Pump (CEP)} = \frac{W_{ideal}}{W_{actual}} * 100\%$$

$$\eta_{CEP} = \frac{(175,31 - 172,73)}{(176,77 - 172,73)} * 100\%$$

$$\eta_{CEP} = \frac{2,58}{4,04} * 100\%$$

$$\eta_{CEP} = 63,89\%$$

Mencari besar *heat losses* pada CEP dengan menggunakan persamaan 3.3 yaitu

$$W_{ideal} = 63,89 \% * 1.726,04$$

$$W_{ideal} = 1.102,76 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned} \text{Heat Losses} &= 1.726,04 - 1.102,76 \\ \text{Heat Losses} &= 623,38 \text{ kW} = 0,032 \% \text{ dari } Q \text{ in} \end{aligned}$$

- $\eta \text{ Turbine Feed Water Pump (TFWP)} = \frac{W_{\text{ideal}}}{W_{\text{actual}}} 100\%$

$$\eta \text{ TFWP} = \frac{(826,61 - 805,44)}{(832,94 - 805,44)} 100\%$$

$$\eta \text{ TFWP} = \frac{21,17}{27,75} 100\%$$

$$\eta \text{ TFWP} = 76,98 \%$$

Mencari besar *heat losses* pada TFWP dengan menggunakan persamaan 3.3 yaitu

$$W_{\text{ideal}} = 16.568,88 * 76,98 \%$$

$$W_{\text{ideal}} = 12.754,66 \text{ kW}$$

$$\text{Heat Losses} = 16.568,88 - 12.754,66$$

$$\text{Heat Losses} = 3.814,22 \text{ kW} = 0,19 \% \text{ dari } Q \text{ in}$$

- $\eta \text{ Boiler Water Circulation Pump (BWCP)} = \frac{W_{\text{ideal}}}{W_{\text{actual}}} 100\%$

$$\eta \text{ BWCP} = \frac{(1657,8 - 1656,7)}{(1658,3 - 1656,7)} 100\%$$

$$\eta \text{ BWCP} = \frac{1,1}{1,6} 100\%$$

$$\eta \text{ BWCP} = 68,75 \%$$

Mencari besar *heat losses* pada BWCP dengan menggunakan persamaan 3.3 yaitu

$$W_{\text{ideal}} = 522,54 * 68,75 \%$$

$$W_{\text{ideal}} = 359,24 \text{ kW}$$

$$\text{Heat Losses} = 522,54 - 359,24$$

$$\text{Heat Losses} = 163,3 \text{ kW} = 0,008\% \text{ dari } Q \text{ in}$$

### 3.8 Unjuk Kerja Kondenser

Menghitung unjuk kerja kondenser berdasarkan persamaan 2.33, membutuhkan beberapa data seperti *mass flow* yang masuk ke kondenser dan selisih enthalpy *input-output*.

#### 3.8.1 Perhitungan Unjuk Kerja Operasional Kondenser

Pada perhitungan unjuk kerja pada kondenser :

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{out} &= \dot{m}_{11}(h_{11} - h_{12}) \\ \dot{Q}_{out} &= 193,01(1977,9 - 177,8) \\ \dot{Q}_{out} &= 347.437,30 \text{ kW}\end{aligned}$$

#### 3.8.2 Perhitungan Unjuk Kerja Aktual Kondenser

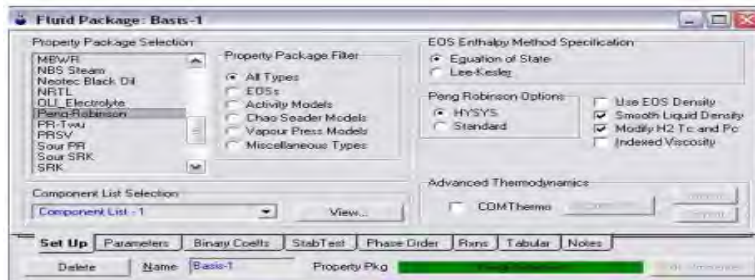
Pada perhitungan unjuk kerja pada kondenser :

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{out} &= \dot{m}_{11}(h_{11} - h_{12}) \\ \dot{Q}_{out} &= 190,23(1.967,05 - 172,3) \\ \dot{Q}_{out} &= 341.415,75 \text{ kW}\end{aligned}$$

### 3.9 Simulasi HYSYS

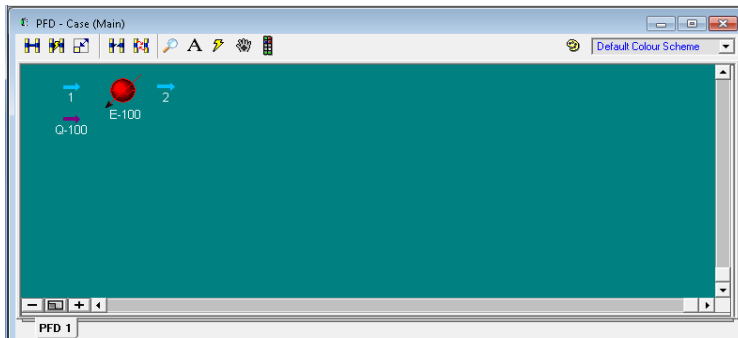
Simulasi HYSYS dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui peluang peningkatan efisiensi sistem dengan cara melakukan perbaikan efisiensi peralatan. Melakukan simulasi dibutuhkan data kondisi awal pada *plant* / kondisi *commisioning*, data dari sistem kontrol dan *monitoring* pada *plant* aktual, data yang diberikan dari *operator engineer* dan dasar perhitungan dari *heat and mass balances* [6].

Pada saat melakukan simulasi, fluida yang akan digunakan yaitu air. *Fluid package* yang akan digunakan menggunakan Peng – Robinson. Peng Robinson dipilih karena persamaan ini dapat menyelesaikan simulasi yang berhubungan dengan gas atau zat non polar, selain itu berfungsi menghitung properti fluida seperti (enthalpy, density, keseimbangan uap-cair).



**Gambar 3.2** Pemilihan *Fluid Package*

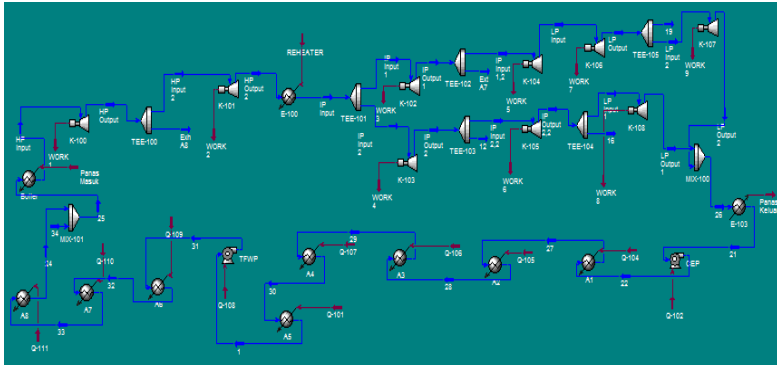
Dalam memulai simulasi ini, membutuhkan *material stream* (panah biru) yang berfungsi mengetahui besarnya laju aliran massa yang masuk dan keluar, energi *stream* (panah merah) yang berfungsi mengetahui besarnya energi yang dibutuhkan atau dihasilkan.



**Gambar 3.3** *Material Stream*

Komponen *heater* berfungsi sebagai pemanas, *expander* yang berfungsi sebagai turbin uap, *cooler* yang berfungsi sebagai kondenser, TEE yang berfungsi untuk memecah aliran fluida menjadi beberapa bagian dan *pump* yang berfungsi sebagai pompa.

Selain itu, tidak hanya nilai *mass flow*, *temperature*, dan *pressure* tetapi juga ada nilai parameter yang lain seperti nilai efisiensi *expander* dan pompa.



**Gambar 3.4** Simulasi HYSYS

Didalam simulasi, peneliti melakukan variasi efisiensi peralatan pompa dan turbin dengan tujuan untuk mengetahui efisiensi maksimal yang dapat diperoleh. Efisiensi peralatan diasumsikan bernilai 10% sampai dengan 99%. Tetapi pada *software* HYSYS, tipe peralatan seperti *heat exchanger* atau boiler tidak ada pilihan untuk memanipulasi efisiensi, sehingga diasumsikan bernilai 100%.

### 3.10 Tahap Perhitungan Efisiensi Sistem

- Perhitungan efisiensi dalam kondisi aktual :

$$\eta = \frac{690.432,22 - 18.817,46}{1.939.557,49} 100\%$$

$$\eta = 34,63 \%$$

- Perhitungan efisiensi dalam kondisi operasional :

$$\eta = \frac{\dot{W}_t - \dot{W}_p}{\dot{Q}_{in}} 100\%$$

$$\eta = \frac{698.784,04 - 16.089,46}{1.650.999,87} 100\%$$

$$\eta = 41,35 \%$$

**Halaman ini memang dikosongkan**

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

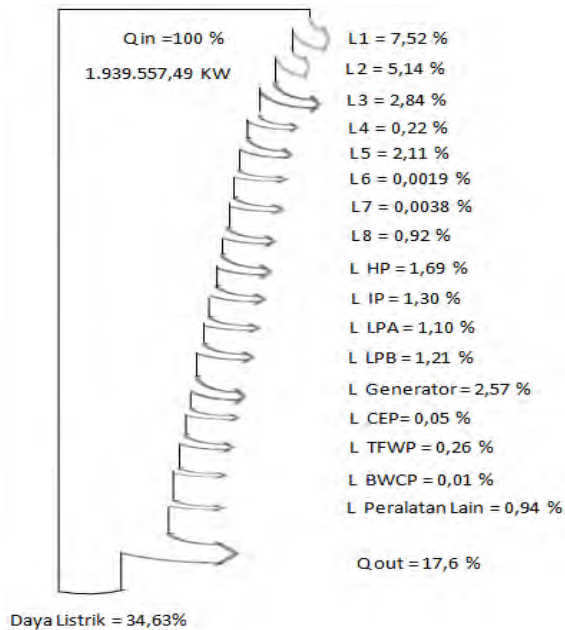
### 4.1 Analisa Keseimbangan Energi dan Diagram Sankey

Pada pembangkit listrik keseimbangan energi merupakan hal penting yang harus diperhatikan, karena keseimbangan energi sangat berkaitan dengan besar energi yang dihasilkan dan energi yang hilang didalam sistem. Analisa keseimbangan energi dapat mengetahui peralatan yang mengalami pemborosan energi :

**Tabel 4.1** Unjuk Kerja dan *Losses* Peralatan

<b>Energi Masuk</b>	<b>Besar (KW)</b>	<b>Persentase (%)</b>
Batubara (Q in)	1.939.557,49	100
<b>Energi Keluar</b>	<b>Besar (KW)</b>	<b>Persentase (%)</b>
HP Turbin	190.494,86	9,82
IP Turbin	280.876,11	14,48
LP Turbin A	107.928,89	5,56
LP Turbin B	111.132,36	5,73
CEP	1.726,05	0,08
TFWP	16.568,88	0,85
BWCP	522,54	0,03
Q out	341.415,75	17,60
Losses Boiler	713.951,11	36,81
Losses HP	32.828,99	1,69
Losses IP	25.155,82	1,30
Losses LP A	21.358,23	1,10
Losses LP B	23.557,20	1,21
Losses Generator	49.802,62	2,57
Losses CEP	623,38	0,032
Losses TFWP	3.814,22	0,19
Losses BWCP	163,30	0,008
Losses Peralatan Lain	1.875,84	0,94

Berdasarkan Tabel 4.1 didapatkan nilai energi panas yang masuk, unjuk kerja komponen utama beserta *losses* yang terjadi pada sistem. Berdasarkan, hukum keseimbangan energi jumlah energi yang masuk harus sama dengan energi yang keluar. Tetapi, pada hasil penelitian, energi yang keluar sebesar 99,06%. Hal ini disebabkan adanya *heat losses* pada komponen lain yang bersifat *minor losses*. Selanjutnya, data yang ada pada Tabel 4.1 direpresentasikan menggunakan diagram sankey.



**Gambar 4.1** Diagram Sankey Penelitian

Berdasarkan hasil representasi dengan diagram sankey, besar energi panas yang masuk ke boiler sebesar 1.939.557,49 kW, besar energi yang masuk berasal dari nilai kalor batubara (HHV) dan banyaknya batubara yang masuk ke boiler. Selanjutnya, nilai unjuk kerja HP turbin sebesar 190.494,86 kW, unjuk kerja HP turbin didapat dari selisih enthalpy *input-output*



sebesar 328,1 kJ/kg dan *mass flow* sebesar 580,608 kg/s. Pada IP turbin, nilai unjuk kerja yang dihasilkan sebesar 280.876,11 kW, hal ini dikarenakan *steam* keluaran HP turbin mengalami *pressure drop* dan suhu turun sehingga menyebabkan nilai enthalpy turun dari 3.332,8 kJ/kg menjadi 2.989,1 kJ/kg, untuk meningkatkan enthalpy dilakukan pemanasan lanjut di *reheater* dimana nilai temperatur *steam* keluaran *reheater* bernilai 538 °C. Pemanasan lanjut ini menyebabkan nilai selisih enthalpy *input-output* pada IP turbin sebesar 586,1 kJ/kg dan *mass flow* sebesar 479,229 kg/s. Pada LP turbin A, nilai unjuk kerja sebesar 107.928,89 kW dengan selisih enthalpy sebesar 567,36 kJ/kg dan *mass flow* sebesar 190,23 kg/s, sedangkan unjuk kerja LP turbin B sebesar 111.132,36 kW dengan selisih enthalpy sebesar 584,18 kJ/kg dan *mass flow* sebesar 190,23 kg/s. *Mass flow* yang masuk ke HP, IP, dan LP turbin mengalami penurunan hal ini dikarenakan ada *steam* yang digunakan untuk *soot blower* pada boiler, pemanasan awal, dan lanjut pada *heater*.

*Steam* keluaran LP turbin mempunyai kualitas uap kurang dari 1, hal ini berarti *steam* mengandung campuran air dan uap. kondisi ini menyebabkan terbatasnya pemanfaatan *steam*, sehingga dibutuhkan peralatan kondenser sebagai pendingin untuk merubah *steam* menjadi air, kondisi ini menyebabkan banyak panas yang keluar. Besar unjuk kerja kondenser sebesar 341.415,75 kW, dengan nilai selisih enthalpy sebesar 2.181,02 kJ/kg dan *mass flow* sebesar 190,23 kg/s.

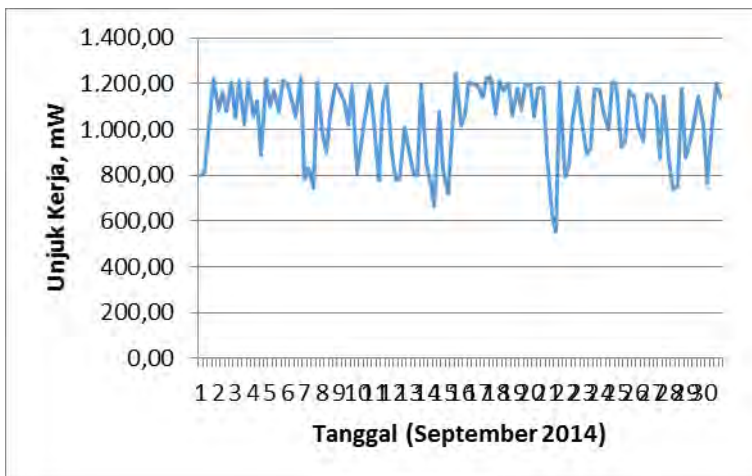
Pada fase cair dibutuhkan sebuah pompa yang berfungsi memindahkan air menuju ke boiler. Pompa yang ada yaitu CEP, TFWP, dan BWCP. Unjuk kerja ini dipengaruhi oleh selisih enthalpy dan *mass flow*. Pada Tabel 4.1 unjuk kerja CEP sebesar 1.726,05 kW, dengan selisih enthalpy sebesar 2,77 kJ/kg dan *mass flow* sebesar 572,64 kg/s. Sedangkan, unjuk kerja TFWP sebesar 16.568,88 kW, dengan selisih enthalpy sebesar 27,5 kJ/kg dan *mass flow* sebesar 602,505 kg/s. Selanjutnya, unjuk kerja BWCP bernilai 522,54 kW, dengan selisih enthalpy sebesar 0,9 kJ/kg dan *mass flow* sebesar 580,608 kg/s. Pada Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa unjuk kerja TFWP terbesar dikarenakan

selisih tekanan *output-input* besar sehingga menyebabkan unjuk kerja yang dibutuhkan besar.

*Losses* pada boiler terbesar yaitu sebesar 713.951,11 kW atau 36,81% dari panas yang masuk, *losses* ini terjadi karena beberapa faktor seperti kurang efektifnya pemanfaatan panas, kadar hidrogen pada bahan bakar, dan kurang panasnya udara pembakaran dll. Sedangkan pada turbin uap *losses* yang dihasilkan masih kecil yaitu sebesar 102.900,24 kW atau 5,30% dari panas yang masuk, *losses* ini terjadi karena perpindahan panas dari turbin ke lingkungan, kondisi sudu turbin terdapat kerak dari *steam* sehingga turbin mengalami getaran dan menyebabkan *heat loss*. *Losses* pada pompa sebesar 6.088,94 kW atau sebesar 0,31% dari panas yang masuk. *Losses* ini terjadi karena adanya kavitasi pada pompa, dan *losses* peralatan lain sebesar 1.875,84 kW atau sekitar 0,94%.

#### 4.2 Unjuk Kerja Boiler

Unjuk kerja boiler didapatkan dari perkalian *mass flow* yang masuk dengan selisih enthalpy *steam* dan *feed water*. Berikut ini adalah unjuk kerja boiler yang dimiliki PLTU Paiton unit 5 :



**Gambar 4.2** Unjuk Kerja Boiler

Pada Gambar 4.2 terdapat grafik unjuk kerja boiler selama bulan September 2014. Unjuk kerja terbesar terletak pada tanggal 17 sebesar 1.225.724,34 kW dan terkecil pada tanggal 22 sebesar 585.980,21 kW. Unjuk kerja yang dihasilkan berbeda-beda dalam sehari. Hal ini dikarenakan kebutuhan daya listrik yang dihasilkan tidak menentu, ketika operator di *control room* menaikkan daya listrik maka *control valve* membuka sehingga *steam* yang masuk bertambah, ketika terjadi perubahan volume dari rendah ke tinggi maka tekanan *steam* mengalami *pressure drop*, untuk mengembalikan kondisi tekanan *steam* pada kondisi ideal maka dibutuhkan jumlah panas yang banyak pada boiler sehingga bahan bakar yang dibutuhkan banyak sehingga unjuk kerja boiler semakin bertambah, begitupun sebaliknya apabila daya listrik yang dihasilkan turun maka unjuk kerja boiler akan turun.

#### 4.2.1 Analisa Efisiensi Boiler

Berdasarkan pada Tabel 3.7 Pada perhitungan efisiensi boiler dengan metode *indirect* didapatkan nilai efisiensi sebesar 63,19%, sedangkan nilai efisiensi boiler pada kondisi operasional sebesar 86,92%.

**Tabel 4.2** Perbandingan nilai efisiensi boiler

<b>Boiler Losses</b>	<b>Desain Operasional</b>	<b>Aktual</b>	<b>Selisih</b>
1. <i>Dry flue gas</i>	4,42	21,56	17,14
2. <i>Due to Hydrogen in fuel</i>	4,13	7,16	3,03
3. <i>Due to moisture in fuel</i>	1,57	3,96	2,39
4. <i>Due to moisture in air</i>	0,26	0,63	0,37
5. <i>Un burnt carbon loss</i>	0,80	0,92	0,12
6. <i>Total Un account loss</i>	1,90	2,57	0,67
Efisiensi Boiler	86,92 %	63,19 %	23,73 %

Berdasarkan Tabel 4.2, Besar *heat loss* terbesar terjadi pada *dry flue gas* (L1). *Losses* ini terjadi karena kurang optimalnya

pemanfaatan panas dalam ruang pembakaran. Pada Tabel 3.10 dapat dilihat bahwa suhu gas buang bernilai  $418^{\circ}\text{C}$  ini berarti suhu gas buang yang dibuang masih panas. Panas gas buang dapat dimanfaatkan dengan memanaskan udara yang akan masuk ke boiler atau dengan memanaskan batubara. Berdasarkan standar ASME PTC 4-1 *losses* terbesar terjadi pada *dry flue gas*, apabila suhu gas buang turun  $20^{\circ}\text{C}$  maka efisiensi boiler naik 1,31%. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh K Dali dengan melakukan kontrol pada sistem pembakaran dan gas buang dapat menghemat 21% dari jumlah bahan bakar. Pemanfaatan ini dapat dilakukan dengan memanfaatkan energi panas gas buang untuk memanaskan udara yang masuk.

Pada *losses hydrogen in fuel*, *losses* ini terjadi karena didalam batubara mengandung atom hydrogen. Berdasarkan reaksi kimia, atom hydrogen dan oksigen ketika bereaksi akan menghasilkan air. Kondisi ini menyebabkan energi panas untuk memanaskan *steam* berkurang karena energi panas juga memanaskan air. Pada *losses* ini langkah perbaikan yang dapat dilakukan yaitu mencari spesifikasi batubara dengan kadar hydrogen rendah sesuai dengan persamaan 2.8.

Pada *losses moisture in fuel*, *losses* ini terjadi karena batubara yang masuk ke boiler mempunyai kadar kelembapan rendah. Sehingga, diperlukan kadar kelembapan tinggi untuk meminimalkan *losses* dengan cara pemanasan batubara, tetapi juga memperhatikan suhu maksimum batubara agar tidak terbakar pada saat proses pemanasan.

Pada *losses moisture in air*, *losses* ini terjadi karena udara yang masuk kedalam boiler masih dalam suhu ambient, sehingga untuk meminimalkan *losses* dibutuhkan pemanasan udara yang masuk ke boiler sehingga ketika udara masuk, udara dalam kondisi panas.

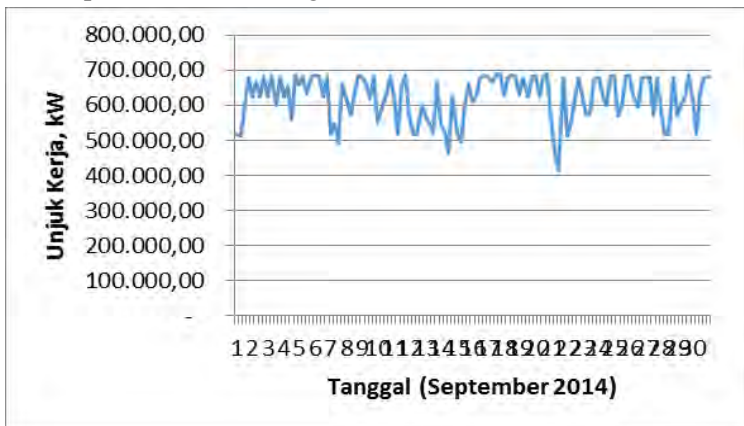
Pada *losses unburnt carbon*, *losses* ini terjadi karena pembakaran batubara tidak sempurna, sehingga menghasilkan abu. Abu ada yang berjenis *bottom ash* dan *fly ash*. *Bottom ash* yaitu abu yang mempunyai massa lebih besar daripada *fly ash*. Kadar abu yang ada dalam batubara berbeda-beda. Semakin

sedikit kandungan abu maka efisiensi pembakaran tinggi, hal ini karena abu batubara sering menempel pada pipa-pipa boiler sehingga proses perpindahan panas dari *furnace* ke pipa terhambat oleh abu. Langkah yang dapat dilakukan yaitu melakukan *soot blower*, yaitu pembersihan berkala terhadap pipa boiler dengan menggunakan *steam* sehingga abu yang menempel pada pipa dapat jatuh.

Pada *loss unaccount*, *losses* yang tidak dapat dihitung yang berasal dari pembakaran atom C yang tidak sempurna, hal ini karena perbandingan udara yang masuk ke boiler tidak sesuai dengan jumlah bahan bakar yang masuk sehingga menimbulkan terjadinya gas karbon monoksida (CO). Berdasarkan persamaan 2.11 semakin besar kadar karbon monoksida maka *losses* yang dihasilkan semakin besar. Langkah pengurangan *losses* dengan memasang teknologi canggih seperti oksigen analyzer sehingga ratio udara dan bahan bakar masuk yang sesuai dengan beban yang dihasilkan.

#### 4.3 Unjuk Kerja Turbin Uap

Berdasarkan perhitungan unjuk kerja turbin menggunakan persamaan 2.20 didapatkan besar nilai unjuk kerja turbin selama bulan September 2014 sebagai berikut :



**Gambar 4.3** Unjuk Kerja Turbin Uap

Pada Gambar 4.3 didapatkan nilai unjuk kerja turbin uap, yang mana nilai unjuk kerja ini nanti akan dikonversikan menjadi energi listrik oleh generator. Unjuk kerja terbesar pada tanggal 18 sebesar 711.329,22 kW dan terkecil pada tanggal 22 sebesar 455.841,43 kW. Berdasarkan persamaan 2.22 Nilai unjuk kerja turbin bergantung pada laju aliran massa yang masuk ke turbin dan selisih enthalpy *input-output*, semakin besar laju aliran massa yang masuk maka unjuk kerja turbin semakin besar.

#### 4.3.1 Analisa Efisiensi Turbin Uap

Berdasarkan perhitungan efisiensi turbin pada hasil simulasi dan aktual pada turbin uap, didapatkan nilai perbandingan sebagai berikut :

**Tabel 4.3** Perbandingan nilai efisiensi turbin uap

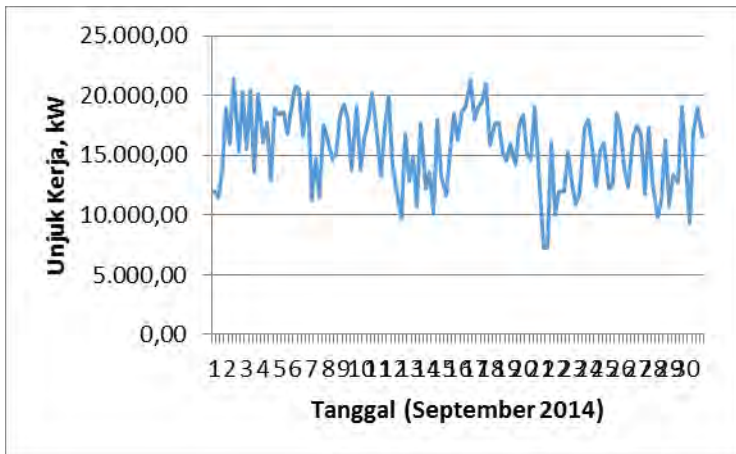
Komponen	$\eta$ Simulasi	$\eta$ Aktual	Selisih <i>Losses</i>
HP Turbin	90,98 %	85,30 %	5,68 %
IP Turbin	93,90 %	91,78 %	2,12%
LP Turbin A	87,36 %	83,48 %	3,88 %
LP Turbin A	87,36 %	82,51 %	4,85 %
Efisiensi Turbin	65,19 %	53,92 %	11,27 %

Berdasarkan Tabel 4.3, Efisiensi HP turbin pada simulasi bernilai 90,98%, sedangkan kondisi aktual bernilai 85,30%. Efisiensi IP turbin pada simulasi bernilai 93,9% dan aktual 91,78%. Efisiensi LP turbin A pada simulasi bernilai 87,36% dan aktual 83,48%, dan efisiensi LP turbin B pada simulasi bernilai 87,36 % dan aktual 82,51%. Dalam turbin uap terdapat sensor seperti sensor suhu, tekanan, laju aliran massa, dan detektor ultrasonik untuk mengetahui adanya udara kondenser yang masuk ke turbin. Berdasarkan data penelitian faktor terbesar yang mempengaruhi yaitu besarnya laju *main steam* pada HP turbin, *exhaust steam* pada HP turbin, *reheat steam*, dan kondisi suhu turbin akibat adanya penumpukan silika. *Selain itu, losses* pada turbin ini dikarenakan berbagai faktor, seperti adanya proses

ireversibilitas dalam turbin, kondisi sudu yang mengalami kerusakan karena adanya kerak yang menempel sehingga menyebabkan rugi gesekan aliran *steam* ketika melewati sudu semakin besar, dan kurangnya pelumasan pada turbin. Oleh karena itu dibutuhkan langkah-langkah pengurangan rugi energi dengan melakukan perbaikan secara berkala dengan membersihkan sudu turbin, melakukan pengecekan kepada komponen turbin termasuk sistem pelumasan turbin.

#### 4.4 Unjuk Kerja Pompa

Berdasarkan perhitungan unjuk kerja pompa menggunakan persamaan 2.24 didapatkan sebagai berikut :



**Gambar 4.4** Unjuk Kerja Pompa

Pada Gambar 4.4, unjuk kerja pompa terbesar pada tanggal 18 sebesar 22.830,92 kW dan terkecil pada tanggal 22 sebesar 18.057,11 kW. Berdasarkan persamaan 2.28, semakin besar laju aliran massa dan selisih enthalpy maka unjuk kerja pompa semakin besar. Laju aliran massa besar maka produksi daya listrik besar. Sedangkan selisih enthalpy disebabkan oleh pompa menaikkan tekanan fluida rendah menjadi tinggi sehingga fluida

dapat dipindahkan. Semakin besar tekanan yang dihasilkan maka unjuk kerja pompa juga besar.

#### 4.4.1 Analisa Efisiensi Pompa

Berdasarkan perhitungan efisiensi pompa pada hasil simulasi dan aktual pada pompa, didapatkan nilai perbandingan sebagai berikut :

**Tabel 4.4** Perbandingan nilai efisiensi pompa

Komponen	$\eta$ Simulasi	$\eta$ Aktual	Selisih <i>Losses</i>
CEP	80 %	63,89 %	16,11%
TFWP	80 %	76,98 %	3,11%
BWCP	80 %	68,75 %	11,25%
Efisiensi pompa	51,20 %	33,81 %	17,39 %

Berdasarkan Tabel 4.4, Efisiensi CEP pada simulasi bernilai 80% dan kondisi aktual bernilai 65,39%. Efisiensi TFWP pada simulasi bernilai 80% dan kondisi aktual bernilai 76,98%. Efisiensi BWCP pada simulasi bernilai 80% dan kondisi aktual bernilai 68,75%. Berdasarkan hasil wawancara dengan pihak operator, *losses* yang sering terjadi pada pompa yaitu adanya peristiwa kavitasi. Kavitasi yaitu peristiwa adanya uap didalam air. Apabila tekanan air dibawah tekanan uap jenuh maka air bisa berubah menjadi uap sehingga kavitasi terbentuk. Kavitasi yang sering terjadi pada sisi isap pompa. Kerusakan yang terjadi terdapat pada bagian impeller pompa, sehingga menyebabkan suara bising pada pompa, berkurangnya kapasitas pompa dan tekanan.

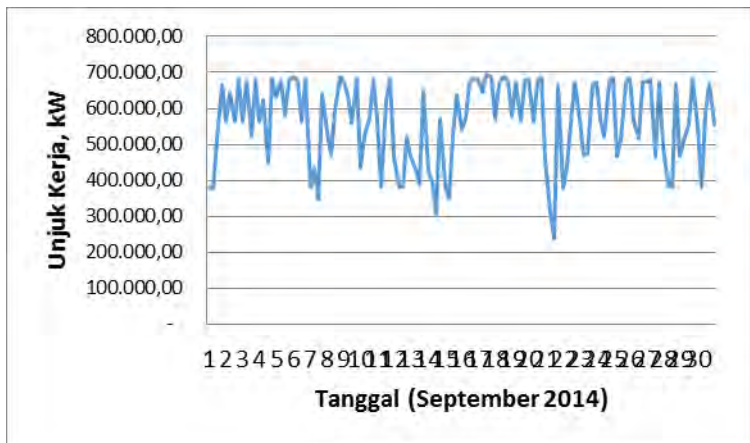
Langkah peluang efisiensi energi yaitu kecepatan aliran pada pipa isap tidak boleh terlalu besar karena dapat menyebabkan tekanan sisi rendah. Selain itu, memilih pompa dengan spesifikasi sesuai karena apabila terjadi perbedaan spesifikasi pompa dengan kebutuhan head yang ada dapat menyebabkan pemborosan energi. Selanjutnya, menemukan titik efisiensi terbaik pompa yang terdapat pada grafik hubungan debit dan head dimana debit dan



head terjadi perpotongan pada grafik sehingga menyebabkan efisiensi pompa pada kondisi maksimum.

#### 4.5 Unjuk Kerja Kondenser

Berdasarkan perhitungan unjuk kerja kondenser menggunakan persamaan 2.25 didapatkan besar nilai unjuk kerja turbin uap selama bulan september 2014 sebagai berikut :

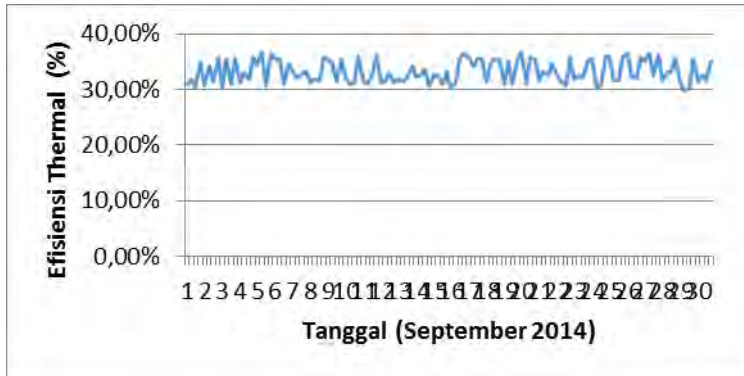


**Gambar 4.5** Unjuk Kerja Kondenser

Pada Gambar 4.5 didapat grafik unjuk kerja kondenser selama bulan September 2014. Unjuk kerja kondenser terbesar pada tanggal 18 September 2014 sebesar 692.843,31 kW dan terkecil pada tanggal 22 september 2014 sebesar 378.896,2 kW. Berdasarkan persamaan 2.33, semakin banyak *steam* yang keluar dari LP turbin dan selisih enthalpy *input-output* maka unjuk kerja kondenser besar karena banyak panas yang terbuang. Komponen kondenser menggunakan air pendingin yang berasal dari air laut. Pada kondenser yang sering terjadi permasalahan yaitu adanya biota laut yang masuk kedalam pipa sehingga menyumbat perpindahan panas, sehingga dibutuhkan filter untuk menyaring biota laut.

#### 4.6 Efisiensi Thermal

Dalam perhitungan mencari efisiensi thermal pada PLTU dapat berdasarkan pada perhitungan efisiensi siklus rankine. Berikut ini grafik efisiensi thermal selama bulan September 2014.



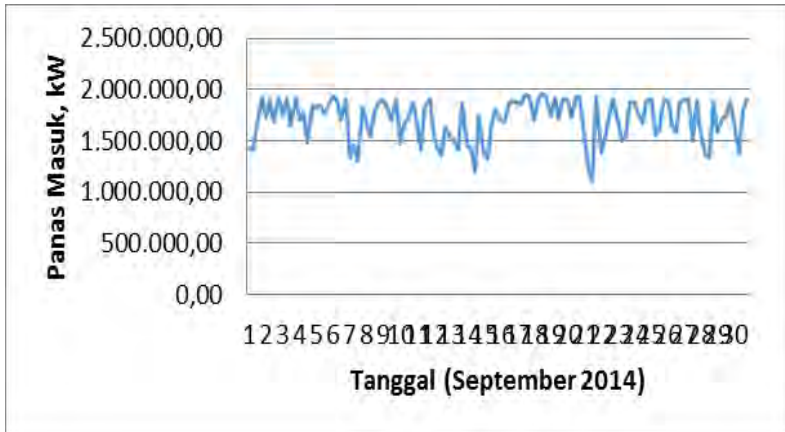
**Gambar 4.6** Grafik Efisiensi Thermal

Pada Gambar 4.6 didapat grafik yang menunjukkan efisiensi thermal pada bulan September 2014. Efisiensi thermal terbesar terletak pada tanggal 28 dengan besar 36,37 % dan terkecil pada tanggal 15 dengan besar 30,75 %. Berdasarkan persamaan 2.35 mencari efisiensi thermal dibutuhkan unjuk kerja turbin, unjuk kerja pompa, dan panas masuk ke boiler.

Pada grafik diatas dapat dilihat semakin besar efisiensi thermal maka produksi daya listrik yang dihasilkan semakin besar, begitupun sebaliknya jika efisiensi thermal kecil maka produksi daya listrik menjadi kecil. Oleh karena itu, supaya efisiensi tinggi maka harus menjaga produksi listrik tinggi.

#### 4.7 Panas yang Masuk ke Boiler

Jumlah panas yang masuk berbanding lurus dengan konsumsi bahan bakar. Panas yang masuk kedalam boiler didapat dari perkalian nilai HHV batubara dengan konsumsi bahan bakar. Nilai HHV diasumsikan bernilai 4.200 kCal/kg. Dibawah ini grafik panas yang masuk kedalam boiler.

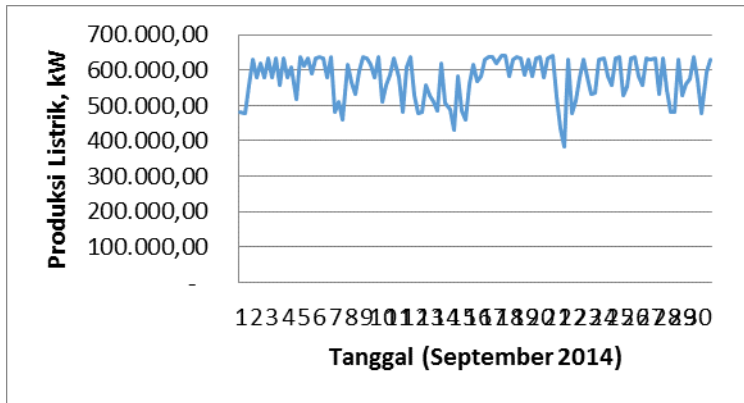


**Gambar 4.7** Grafik Jumlah Panas yang Masuk

Pada Gambar 4.7 didapat grafik konsumsi batubara selama bulan september 2014. Konsumsi terbesar pada tanggal 17 sebesar 1.957.396,3 kW dan terkecil pada tanggal 22 sebesar 1.308.226,90 kW. Besar panas yang masuk kedalam berhubungan dengan unjuk kerja boiler, semakin besar unjuk kerja boiler maka semakin besar pula energi panas yang masuk. Tetapi ketika unjuk kerja boiler turun maka jumlah energi yang masuk pun juga berkurang dan menyebabkan proses produksi listrik pun berkurang. Selain itu, berdasarkan hasil wawancara besar panas yang masuk ke boiler tidak semua dapat diterima oleh *steam* karena di dalam boiler terdapat banyak abu/slag yang menempel pada pipa-pipa sehingga mengurangi perpindahan panas.

#### 4.8 Profil Produksi Daya Listrik

Produksi daya listrik yang dihasilkan oleh PLTU. Pada gambar dibawah ini dapat dilihat produksi daya listrik selama bulan September 2014.

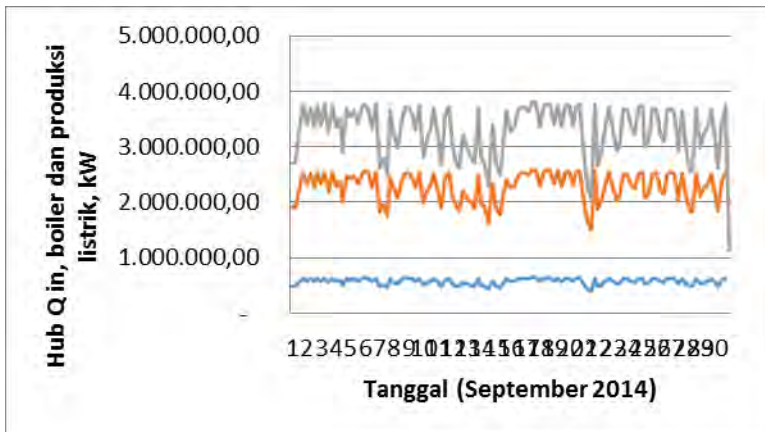


**Gambar 4.8** Grafik Produksi Daya Listrik

Pada Gambar 4.8 produksi daya listrik terbesar pada tanggal 17 sebesar 640.023 kW. Produksi listrik yang dihasilkan mengalami fluktuasi, hal ini bergantung pada permintaan PLN karena pada waktu tertentu produksi listrik tinggi dan pada waktu tertentu produksi listrik menurun. Produksi energi listrik akan menjadi besar apabila aliran *steam* yang masuk ke turbin besar.

#### 4.9 Perbandingan Panas Masuk ,Unjuk Kerja Boiler, dan Produksi Listrik

Hubungan dari jumlah panas yang masuk ke boiler, unjuk kerja boiler dan produksi listrik yang dihasilkan. Warna merah untuk unjuk kerja boiler, warna hijau untuk jumlah panas yang masuk, dan biru untuk produksi listrik. Berikut ini jumlah panas yang masuk ke boiler, unjuk kerja boiler dan produksi listrik selama bulan September 2014.



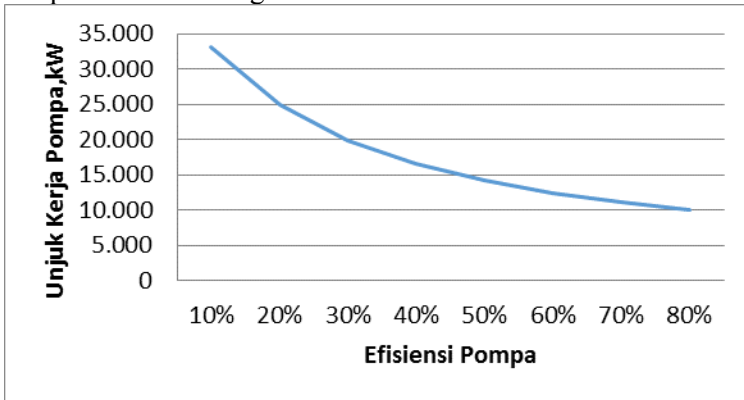
**Gambar 4.9** Grafik Jumlah Panas yang Masuk ke Boiler, Unjuk Kerja Boiler dan Produksi Listrik

Pada Gambar 4.9 dapat dijelaskan hubungan jumlah panas yang masuk, besar unjuk kerja boiler dan produksi listrik. Pada saat tanggal 8 September 2014, produksi daya listrik rendah maka jumlah panas dan unjuk kerja boiler rendah. Akan tetapi, pada saat tanggal 10 September 2014 produksi daya tinggi maka jumlah panas dan unjuk kerja boiler juga tinggi.

Pada Gambar 4.9 terjadi pemborosan energi ketika menaikkan produksi listrik dari beban rendah ke tinggi. Berdasarkan penelitian oleh K, Dali pemborosan energi yang terjadi pada boiler dikarenakan adanya peristiwa *fouling*. Peristiwa *fouling* yaitu sebuah peristiwa menempelnya abu batubara pada pipa penghantar panas, karena berhubungan dengan kadar abu batubara maka *fouling* akan semakin mudah terjadi. Efek *fouling* yaitu terjadinya penurunan suhu dan kenaikan *pressure drop* pada outlet penghantar panas, sehingga untuk menaikkan suhu outlet dan meminimalkan *pressure drop* pada kondisi ideal dibutuhkan panas yang lebih banyak.

#### 4.10 Hasil Simulasi HYSYS

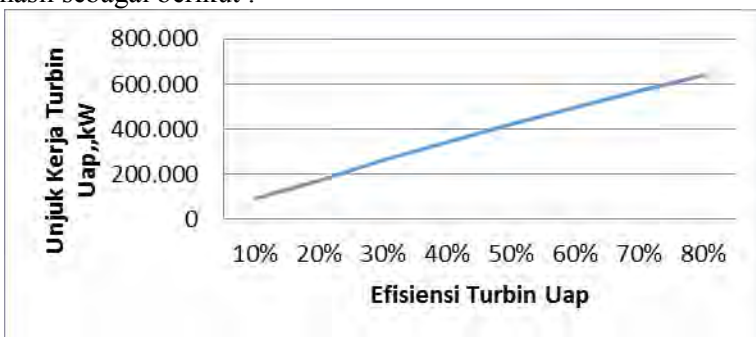
Hasil simulasi HYSYS dengan menggunakan variasi efisiensi peralatan pompa dengan jangkauan 10%-80% didapatkan hasil sebagai berikut :



**Gambar 4.10** Grafik Efisiensi Pompa

Pada Gambar 4.10 dapat dijelaskan bahwa pompa memiliki unjuk kerja besar atau boros energi ketika pompa memiliki efisiensi dibawah 50%. Tetapi akan hemat energi ketika efisiensi bernilai 80%.

Hasil simulasi HYSYS dengan menggunakan variasi efisiensi peralatan turbin dengan jangkauan 10%-80% didapatkan hasil sebagai berikut :



**Gambar 4.11** Grafik Efisiensi Turbin

Pada Gambar 4.11 dapat dijelaskan bahwa turbin uap memiliki unjuk kerja besar ketika efisiensi turbin uap mengalami kenaikan. Semakin besar efisiensi turbin maka nilai unjuk kerja turbin juga besar.

#### 4.11 Potensi Penghematan

Berdasarkan Tabel 4.2 untuk meningkatkan efisiensi boiler maka langkah-langkah yang harus diperhatikan yaitu meminimalkan *losses* yang ada pada L1, L2, dan L3.

Pada L1 potensi penghematan yang dapat dilakukan dengan memanfaatkan gas buang dari pembakaran untuk memanaskan udara pembakaran. Menentukan potensi penghematan yang dibutuhkan yaitu data efisiensi boiler. Nilai efisiensi didapat dari perhitungan menggunakan metode *indirect*.

Apabila nilai efisiensi boiler bernilai 63,19%, dengan banyak batubara yang masuk ke boiler sebanyak 394.601 kg/jam dengan nilai asumsi harga batubara Rp 614,53/kg.

$$Kerugian = \left(1 - \frac{\eta_{actual}}{\eta_{operasional}}\right) * \text{Banyak BB} * \text{Harga BB}$$

$$Kerugian = \left(1 - \frac{63,19}{86,92}\right) * 394.601 * 614,53$$

$$Kerugian = \text{Rp. } 66.443.397 / \text{jam}$$

Potensi penghematan dengan menggunakan *air heater* yang bertujuan memanaskan udara pembakaran yang masuk ke boiler dengan memanfaatkan gas buang boiler dengan suhu 418 °C didapatkan nilai efisiensi boiler menjadi 65,17%.

$$Kerugian = \left(1 - \frac{65,17}{86,92}\right) * 394.601 * 749,88$$

$$Kerugian = \text{Rp. } 60.866.032 / \text{jam}$$

Potensi penghematan dengan penambahan *air heater* pada PLTU didapatkan dari PP tanpa *air heater* dikurangi dengan

PP menggunakan *air heater* didapatkan nilai ekonomis sebesar Rp. 5.577.365/ jam atau Rp. 48.188.433.600/ tahun.

Berdasarkan perhitungan dalam menentukan besar investasi dapat dilakukan dengan mengetahui nilai *BEP* dan nilai *IRR*. Nilai harga investasi *air heater* bernilai 134.000.000.000

$$BEP = \frac{\text{Investasi (per tahun)}}{\text{Peluang Penghematan (per tahun)}}$$

$$BEP = \frac{144.000.000.000}{48.188.433.600}$$

$$BEP = 2,9$$

Nilai *BEP* bernilai 2,9 artinya modal investasi penambahan *air heater* akan kembali pada tahun ke 3. Pada tahun ke 3 maka akan terjadi keuntungan pada perusahaan.

Selanjutnya menentukan nilai *r* dengan menggunakan persamaan *cash in flow*.

$$CIF = -I + \frac{PP}{(1+r)} + \frac{PP}{(1+r)^2} + \frac{PP}{(1+r)^3}$$

$$0 = -144 \text{ Milyar} + \frac{48 \text{ M}}{(1+r)} + \frac{48 \text{ M}}{(1+r)^2} + \frac{48 \text{ M}}{(1+r)^3}$$

Berdasarkan perhitungan menggunakan *cash in flow*, didapatkan nilai *r* sebesar 0,17 atau 17%, sedangkan besar bunga pada bank bernilai 15% yang berarti investasi penambahan *air heater* menguntungkan.

#### 4.12 Rekomendasi

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, telah terbukti bahwa didalam peralatan utama terdapat *heat loss*. *Heat loss* tidak



dapat dihilangkan tetapi dapat diminimalkan. Langkah-langkah meminimalkan *heat loss* seperti :

- Menggunakan peralatan sesuai prosedur operasi seperti melakukan proses produksi listrik dengan beban lebih dari 50% *full load*.
- Melakukan *maintenance* pada peralatan secara berkala untuk meningkatkan kinerja dan efisiensi peralatan selain itu dapat menambah umur peralatan sehingga biaya penggantian peralatan dapat diminimalkan.
- Melakukan *soot blower* secara berkala untuk menghilangkan abu yang menempel pada pipa boiler.
- Mencari batubara dengan nilai kalor tinggi (HHV diatas 4200 kCal/kg) dengan kadar hydrogen dibawah 4,48%.
- Memanaskan batubara sebelum masuk ke boiler.
- Berdasarkan hasil simulasi, dengan memperbaiki nilai efisiensi pada turbin uap dan pompa dapat meminimalkan pemborosan energi. Apabila nilai efisiensi turbin dan pompa kurang dari 50% maka dapat dilakukan pergantian peralatan.
- Memanfaatkan gas buang dari pembakaran untuk memanaskan udara pembakaran dengan menggunakan *air heater*.
- Penambahan *air heater* didapatkan nilai ekonomis sebesar Rp. 48.188.433.600/ tahun

**Halaman ini memang dikosongkan**

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan pada hasil penelitian tugas akhir yang sudah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut :

- Pada kondisi beban 100% *full load*, hasil yang didapat jumlah panas yang masuk sebesar 1.939.557,49 kW, unjuk kerja boiler sebesar 1.225.724,66 kW dengan nilai efisiensi 63,19%, unjuk kerja turbin uap sebesar 690.432,22 kW dengan nilai efisiensi 53,92%, besar produksi daya sebesar 640.625 kW, unjuk kerja pompa sebesar 18.817,46 kW dengan nilai efisiensi 33,81%, unjuk kerja kondenser sebesar 706.177,36 kW dan nilai efisiensi thermal sebesar 34,63%.
- Pemborosan energi terbesar terletak pada boiler dengan *losses* sebesar 713.951,11 kW. Turbin uap mengalami *losses* sebesar 26.594,1 kW. Pompa mengalami *losses* sebesar 4.013,71 kW dan peluang penghematan yang dapat dilakukan dengan menambahkan *air heater* sebesar Rp. 5.577.365/ jam investasi sebesar 144 Milyar didapatkan nilai BEP 2,9 dan nilai r sebesar 17% sehingga investasi dianggap menguntungkan.
- Pada hasil simulasi menggunakan *software* HYSYS pada kondisi 100% *full* didapatkan hasil simulasi dengan nilai efisiensi thermal 41,35%, dengan nilai efisiensi turbin uap dan pompa sebesar 80%.

#### **5.2 Saran**

Saran yang diberikan untuk dilakukan penelitian selanjutnya yaitu :

- Melakukan penelitian dengan variasi beban 75% dan 50%
- Melakukan perhitungan daya listrik tentang komponen pendukung seperti *conveyor*, generator, *mill*, *heater*, *fan*, *transformator step up* supaya perhitungan semakin lengkap.

**Halaman ini memang dikosongkan**

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Amokrane Masri, Mohand. "Energy Saving in Refinery Plants and its Environmental Impact". *World Petroleum Congress*
- [2]. Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, 2012. "Perencanaan Efisiensi dan Elastisitas Energi 2012".
- [3]. BHEL manual of Turbo generator of KTPS V stagepublish in 1997
- [4]. Bureau of energy efficiency Energy audit Guide books 1, 2, 3.4 published in 2005
- [5]. Dongellini, Matteo,2013. "Energy audit of an industrial site: a case study" 68th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association. Hal 424-433.
- [6]. Fitria, Lutfiatus,2014."Audit Energi Pada Gas Turbin Generator (GTG) Untuk Produksi Energi Listrik (Studi Kasus Pada PT Petrokimia Gresik-Jawa Timur)".
- [7]. Kamaruddin Abd Hamid, Mohd. "HYSYS : An Introduction to Chemical Engineering Simulation"
- [8]. Khatib, Moh,2004."Audit Energi Pada WHB (Waste Heat Boiler) Untuk Pemenuhan Kebutuhan Steam Pada Proses Urea (Studi Kasus Pada PT Petrokimia Gresik-Jawa Timur)",*Audit Energi dan Analisa Termodinamika*(2014). hal 5-16.
- [9]. Kumar, Ch. Kiran dan G.Srinivasa Rao,2013."Performance Analysis From The Energy Audit Of A Thermal Power Plant" *IJETT – Volume 4 Issue 6 – June*. hal 2485
- [10]. Marzuki, 2008. "Audit Energi Pada Boiler dan Kompresor Studi Kasus pada PT. Coca-Coca Bottling Indonesia Pasuruan.

- [11]. Moran, Michael J dan Shapiro, Howard N.2004. *“Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 4<sup>th</sup> edition”*. John Willey & sons Inc, New York.
- [12]. Nungky Ristyanto, Anang. *“Simulasi Perhitungan Efisiensi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (Pltu) Rembang”*.
- [13]. Sindhu Kamarga, Willhansen, 2012. *“Audit Energi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas Studi Kasus Pada PT. Indonesia Power USB Pesanggaran Unit 3 Denpasar-Bali”*. Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri ITS Surabaya.
- [14]. Tveit, Tor-Martin.2003 *“A Simulation Model of A sulphuric Acid Production Process as An Integrated Part of An Energy System”*.

LAMPIRAN A  
DATA OPERASIONAL KOMPONEN

BOILER								
TANGGAL	m (kg/s)	P in (Bar)	P out (Bar)	T in (°C)	T out (°C)	ENTHALPY H1	ENTHALPY H2	Unjuk Kerja, W
01/09/2014	418,05	141,60	128,77	268,40	534,65	1.176,65	3.430,12	1.433.955,50
02/09/2014	510,14	172,83	156,82	278,40	529,15	1.226,38	3.382,69	1.725.660,53
03/09/2014	517,31	172,68	156,33	278,44	525,20	1.226,59	3.372,27	1.744.517,45
04/09/2014	504,70	173,28	156,50	278,60	528,95	1.227,37	3.382,51	1.707.168,75
05/09/2014	535,42	183,03	166,29	281,52	530,20	1.241,71	3.385,94	1.812.913,45
06/09/2014	571,90	185,61	167,79	283,80	524,20	1.253,05	3.372,75	1.928.888,34
07/09/2014	391,04	140,25	127,96	267,68	535,80	1.173,01	3.434,08	1.342.862,21
08/09/2014	492,74	169,26	153,82	277,04	530,75	1.219,63	3.390,67	1.670.706,90
09/09/2014	559,23	182,49	164,67	283,12	527,05	1.249,78	3.376,90	1.888.472,43
10/09/2014	430,91	154,05	141,06	271,48	534,10	1.191,83	3.414,71	1.471.440,61
11/09/2014	492,86	171,18	156,19	278,36	532,70	1.226,24	3.393,33	1.672.449,10
12/09/2014	458,43	156,75	141,79	273,32	530,45	1.201,13	3.403,97	1.560.486,80
13/09/2014	453,12	156,45	142,52	273,16	534,10	1.200,32	3.413,02	1.546.508,57

14/09/2014	425,41	149,94	136,05	270,68	534,80	1.187,85	3.422,30	1.455.871,75
15/09/2014	404,22	142,56	129,83	268,28	535,20	1.175,98	3.430,38	1.386.642,87
16/09/2014	503,87	171,36	155,70	277,56	521,95	1.222,19	3.364,00	1.695.024,19
17/09/2014	555,52	183,72	165,90	283,36	530,85	1.250,93	3.387,29	1.881.709,10
18/09/2014	500,54	171,69	157,03	278,36	530,75	1.226,22	3.386,91	1.695.297,22
19/09/2014	514,88	174,03	158,47	278,48	529,55	1.226,74	3.381,86	1.741.253,81
20/09/2014	564,99	185,13	167,56	283,36	525,35	1.250,87	3.375,25	1.906.992,03
21/09/2014	455,10	157,74	143,42	273,40	530,80	1.201,51	3.403,00	1.548.719,92
22/09/2014	403,90	139,95	126,75	267,28	535,15	1.170,96	3.433,73	1.386.898,45
23/09/2014	496,83	172,56	157,33	278,28	532,30	1.225,78	3.390,88	1.684.696,65
24/09/2014	553,28	183,00	165,28	283,04	528,05	1.249,35	3.379,91	1.870.037,00
25/09/2014	564,93	184,92	166,89	283,36	525,90	1.250,88	3.375,96	1.907.175,01
26/09/2014	561,66	185,31	167,61	283,40	525,30	1.251,06	3.375,18	1.895.717,98
27/09/2014	565,82	182,73	164,85	282,88	523,90	1.248,56	3.369,09	1.906.314,36
28/09/2014	467,26	164,55	150,30	274,72	533,55	1.208,03	3.402,51	1.589.871,98
29/09/2014	465,73	155,61	141,15	272,96	527,45	1.199,33	3.396,59	1.581.886,52
30/09/2014	496,58	168,48	152,52	277,52	527,70	1.222,08	3.383,76	1.680.293,56



High Pressure Turbine								
Tanggal	m (kg/s)	P in (Bar)	P out (Bar)	T in (°C)	T out (°C)	ENTHALPY H1	ENTHALPY H2	Unjuk Kerja (W)
01/09/2014	435,08	128,77	30,58	534,65	335,65	3.430,12	3.079,21	152.676,04
02/09/2014	524,54	156,82	36,92	529,15	330,15	3.382,69	3.049,35	174.851,36
03/09/2014	523,71	156,33	36,85	525,20	326,20	3.372,27	3.039,68	174.180,01
04/09/2014	569,14	156,50	37,00	528,95	329,95	3.382,51	3.048,65	190.018,76
05/09/2014	523,24	166,29	38,85	530,20	331,20	3.385,94	3.046,91	177.393,79
06/09/2014	554,01	167,79	40,79	524,20	325,20	3.372,75	3.026,25	191.961,48
07/09/2014	576,51	127,96	30,25	535,80	336,80	3.434,08	3.082,79	202.518,69
08/09/2014	433,43	153,82	35,94	530,75	331,75	3.390,67	3.055,91	145.096,50
09/09/2014	510,89	164,67	40,27	527,05	328,05	3.376,90	3.035,10	174.625,96
10/09/2014	571,17	141,06	32,45	534,10	335,10	3.414,71	3.073,11	195.112,24
11/09/2014	462,57	156,19	36,92	532,70	333,70	3.393,33	3.058,19	155.021,18
12/09/2014	524,59	141,79	33,51	530,45	331,45	3.403,97	3.061,49	179.656,37
13/09/2014	477,94	142,52	33,51	534,10	335,10	3.413,02	3.070,41	163.745,54

14/09/2014	477,94	136,05	32,00	534,80	335,80	3.422,30	3.075,95	165.529,57
15/09/2014	457,27	129,83	30,64	535,20	336,20	3.430,38	3.080,39	160.043,58
16/09/2014	438,06	155,70	36,27	521,95	322,95	3.364,00	3.033,19	144.915,41
17/09/2014	513,34	165,90	40,44	530,85	331,85	3.387,29	3.044,28	176.083,78
18/09/2014	573,97	157,03	36,89	530,75	331,75	3.386,91	3.053,41	191.419,29
19/09/2014	526,37	158,47	37,21	529,55	330,55	3.381,86	3.049,58	174.903,50
20/09/2014	529,82	167,56	40,54	525,35	326,35	3.375,25	3.029,95	182.946,84
21/09/2014	574,21	143,42	33,31	530,80	331,80	3.403,00	3.062,87	195.306,16
22/09/2014	475,01	126,75	30,10	535,15	336,15	3.433,73	3.081,63	167.251,28
23/09/2014	431,80	157,33	36,93	532,30	333,30	3.390,88	3.057,18	144.089,27
24/09/2014	524,76	165,28	40,32	528,05	329,05	3.379,91	3.037,50	179.683,44
25/09/2014	570,93	166,89	40,48	525,90	326,90	3.375,96	3.031,52	196.649,84
26/09/2014	575,32	167,61	40,57	525,30	326,30	3.375,18	3.029,73	198.742,08
27/09/2014	575,23	164,85	40,24	523,90	324,90	3.369,09	3.027,15	196.694,34
28/09/2014	570,49	150,30	34,62	533,55	334,55	3.402,51	3.066,21	191.855,98
29/09/2014	491,04	141,15	33,50	527,45	328,45	3.396,59	3.054,21	168.122,99
30/09/2014	516,82	152,52	36,45	527,70	328,70	3.383,76	3.046,97	174.061,16

Intermediate Pressure Turbine								
Tanggal	m (kg/s)	P in (Bar)	P out (Bar)	T in (°C)	T out (°C)	ENTHALPY H1	ENTHALPY H2	Unjuk Kerja, W
01/09/2014	374,52	28,22	4,03	519,25	232,56	3.501,69	2.928,00	199.818,36
02/09/2014	463,19	34,18	4,86	531,07	235,80	3.522,30	2.931,57	254.469,58
03/09/2014	462,78	34,07	4,84	521,52	231,96	3.500,74	2.923,54	248.421,69
04/09/2014	461,69	34,25	4,90	534,02	237,78	3.528,91	2.935,61	254.751,74
05/09/2014	485,79	36,12	5,27	539,93	241,20	3.540,51	2.941,43	270.660,38
06/09/2014	512,71	37,86	5,43	527,15	231,72	3.509,65	2.920,64	280.856,29
07/09/2014	380,62	27,98	3,98	538,91	243,84	3.546,06	2.951,64	210.409,66
08/09/2014	446,40	33,18	4,82	537,68	240,06	3.538,26	2.940,70	248.078,71
09/09/2014	504,58	37,36	5,38	536,27	239,70	3.530,96	2.937,80	278.350,39
10/09/2014	403,35	30,02	4,36	540,95	242,82	3.548,73	2.948,16	225.280,91
11/09/2014	456,39	34,22	4,89	539,68	242,22	3.541,78	2.944,98	253.307,11
12/09/2014	422,17	30,98	4,51	525,67	230,22	3.513,33	2.921,20	232.480,75
13/09/2014	418,10	30,98	4,48	537,20	239,10	3.539,33	2.939,96	233.057,40
14/09/2014	400,92	29,54	4,26	537,65	238,74	3.541,75	2.940,02	224.360,02

15/09/2014	385,24	28,39	4,02	539,15	241,80	3.546,21	2.947,27	214.582,47
16/09/2014	455,20	33,69	4,86	522,72	234,90	3.503,86	2.929,66	243.079,58
17/09/2014	503,08	37,51	5,37	537,43	240,72	3.533,46	2.940,01	277.652,93
18/09/2014	457,33	34,16	4,93	538,96	240,60	3.540,21	2.941,44	254.669,16
19/09/2014	463,34	34,45	4,98	533,36	237,12	3.527,21	2.933,91	255.658,30
20/09/2014	504,85	37,57	5,47	538,77	239,28	3.536,44	2.936,58	281.639,40
21/09/2014	416,09	30,82	4,47	535,57	238,38	3.535,81	2.938,45	231.158,16
22/09/2014	380,72	27,80	3,94	536,69	241,26	3.541,26	2.946,43	210.611,32
23/09/2014	457,75	34,20	4,93	538,82	240,96	3.539,85	2.942,17	254.431,30
24/09/2014	502,43	37,39	5,35	538,51	238,02	3.536,04	2.934,34	281.149,72
25/09/2014	506,26	37,55	5,38	536,49	237,24	3.531,27	2.932,56	281.887,50
26/09/2014	505,59	37,56	5,42	538,47	240,00	3.535,77	2.938,29	280.933,54
27/09/2014	505,90	37,29	5,38	528,67	234,00	3.513,70	2.925,68	276.659,03
28/09/2014	427,56	32,08	4,68	540,28	242,76	3.545,21	2.946,88	237.914,90
29/09/2014	421,17	31,06	4,41	526,55	233,04	3.515,21	2.927,53	230.190,37
30/09/2014	453,54	33,65	4,85	534,44	238,98	3.530,47	2.938,29	249.776,67

Low Pressure Turbine A								
Tanggal	m (kg/s)	P in (Bar)	P out (Bar)	T in (°C)	T out (°C)	ENTHALPY H1	ENTHALPY H2	Unjuk Kerja, W
01/09/2014	202,44	4,03	0,08	232,56	40,81	2.928,00	2.575,57	66.352,08
02/09/2014	178,46	4,86	0,09	235,80	42,93	2.931,57	2.579,60	58.415,15
03/09/2014	202,67	4,84	0,08	231,96	41,79	2.923,54	2.577,18	65.280,92
04/09/2014	184,93	4,90	0,08	237,78	42,17	2.935,61	2.577,18	61.643,87
05/09/2014	195,81	5,27	0,08	241,20	43,12	3.098,34	2.577,99	94.755,13
06/09/2014	203,76	5,43	0,09	231,72	42,64	3.171,98	2.578,80	112.405,85
07/09/2014	153,19	3,98	0,07	243,84	39,34	2.951,54	2.572,46	54.006,29
08/09/2014	180,57	4,82	0,08	240,06	41,66	2.940,69	2.576,38	61.178,32
09/09/2014	201,87	5,38	0,08	239,70	42,52	3.162,65	2.577,99	109.764,34
10/09/2014	163,49	4,36	0,07	242,82	40,70	2.948,08	2.573,90	56.891,85
11/09/2014	185,41	4,89	0,08	242,22	41,90	2.944,90	2.575,98	63.612,76
12/09/2014	168,92	4,51	0,07	230,22	40,46	2.921,20	2.574,36	54.486,74
13/09/2014	168,92	4,48	0,08	239,10	40,75	2.939,96	2.574,77	57.369,75
14/09/2014	161,62	4,26	0,07	238,74	40,40	2.940,02	2.573,90	55.028,39

15/09/2014	154,83	4,02	0,07	241,80	39,41	2.947,23	2.573,42	53.823,96
16/09/2014	181,43	4,86	0,08	234,90	41,54	2.929,66	2.576,38	59.609,17
17/09/2014	202,86	5,37	0,08	240,72	42,58	3.159,06	2.577,59	109.700,81
18/09/2014	186,04	4,93	0,08	240,60	41,77	2.941,42	2.575,98	63.227,33
19/09/2014	187,26	4,98	0,08	237,12	42,48	2.933,91	2.576,78	62.192,38
20/09/2014	202,95	5,47	0,08	239,28	43,25	3.211,65	2.578,39	119.521,28
21/09/2014	167,88	4,47	0,07	238,38	41,24	2.938,45	2.574,36	56.845,64
22/09/2014	152,61	3,94	0,07	241,26	39,26	2.946,40	2.572,46	53.072,86
23/09/2014	185,47	4,93	0,08	240,96	41,97	2.942,14	2.575,57	63.227,75
24/09/2014	201,79	5,35	0,08	238,02	42,68	3.141,80	2.577,59	105.881,46
25/09/2014	203,34	5,38	0,08	237,24	43,07	3.158,82	2.577,18	109.989,11
26/09/2014	203,31	5,42	0,08	240,00	42,70	3.185,68	2.577,18	115.050,23
27/09/2014	201,63	5,38	0,08	234,00	42,85	3.150,28	2.577,59	107.388,89
28/09/2014	173,55	4,68	0,08	242,76	41,92	2.946,79	2.575,98	59.850,50
29/09/2014	169,15	4,41	0,07	233,04	41,13	2.927,53	2.573,90	55.631,11
30/09/2014	182,66	4,85	0,08	238,98	41,86	2.938,29	2.576,78	61.412,66

Low Pressure Turbine B								
Tanggal	m (kg/s)	P in (Bar)	P out (Bar)	T in (°C)	T out (°C)	ENTHALPY H1	ENTHALPY H2	Unjuk Kerja, W
01/09/2014	202,44	4,03	0,06	232,56	38,49	2.928,00	2.568,43	67.696,99
02/09/2014	178,46	4,86	0,07	235,80	40,28	2.931,57	2.571,03	59.838,61
03/09/2014	202,67	4,84	0,06	231,96	39,56	2.923,54	2.569,48	66.732,97
04/09/2014	184,93	4,90	0,06	237,78	39,71	2.935,61	2.569,48	62.968,86
05/09/2014	195,81	5,27	0,07	241,20	40,57	3.098,34	2.570,01	96.209,06
06/09/2014	203,76	5,43	0,07	231,72	40,48	3.171,98	2.570,53	113.971,94
07/09/2014	153,19	3,98	0,06	243,84	37,65	2.951,54	2.566,27	54.888,32
08/09/2014	180,57	4,82	0,06	240,06	39,75	2.940,69	2.568,96	62.424,97
09/09/2014	201,87	5,38	0,06	239,70	40,51	3.162,65	2.569,48	111.361,98
10/09/2014	163,49	4,36	0,06	242,82	38,73	2.948,08	2.567,38	57.883,07
11/09/2014	185,41	4,89	0,06	242,22	39,43	2.944,90	2.568,43	64.913,98
12/09/2014	168,92	4,51	0,06	230,22	38,57	2.921,20	2.567,38	55.584,20
13/09/2014	168,92	4,48	0,06	239,10	38,72	2.939,96	2.568,43	58.365,37
14/09/2014	161,62	4,26	0,06	238,74	38,74	2.940,02	2.567,38	56.008,26

15/09/2014	154,83	4,02	0,06	241,80	37,80	2.947,23	2.566,27	54.853,28
16/09/2014	181,43	4,86	0,06	234,90	39,32	2.929,66	2.568,96	60.861,79
17/09/2014	202,86	5,37	0,06	240,72	40,08	3.159,06	2.569,48	111.230,27
18/09/2014	186,04	4,93	0,06	240,60	39,43	2.941,42	2.568,43	64.532,98
19/09/2014	187,26	4,98	0,06	237,12	40,04	2.933,91	2.568,96	63.555,37
20/09/2014	202,95	5,47	0,07	239,28	40,58	3.211,65	2.570,53	121.005,09
21/09/2014	167,88	4,47	0,06	238,38	38,39	2.938,45	2.567,38	57.936,36
22/09/2014	152,61	3,94	0,06	241,26	37,38	2.946,40	2.566,27	53.951,57
23/09/2014	185,47	4,93	0,06	240,96	39,23	2.942,14	2.567,90	64.550,57
24/09/2014	201,79	5,35	0,06	238,02	40,40	3.141,80	2.568,96	107.501,44
25/09/2014	203,34	5,38	0,06	237,24	39,78	3.158,82	2.568,96	111.545,35
26/09/2014	203,31	5,42	0,06	240,00	39,81	3.185,68	2.568,96	116.606,23
27/09/2014	201,63	5,38	0,06	234,00	40,39	3.150,28	2.569,48	108.909,06
28/09/2014	173,55	4,68	0,06	242,76	39,48	2.946,79	2.568,96	60.983,68
29/09/2014	169,15	4,41	0,06	233,04	38,66	2.927,53	2.567,38	56.656,69
30/09/2014	182,66	4,85	0,06	238,98	39,30	2.938,29	2.568,96	62.742,23



CONDENSATE EXTRACTION PUMP					
Tanggal	P in (Bar)	P out (Bar)	T out (°C)	Volume (V)	Unjuk Kerja, W
01/09/2014	1,00	32,94	38,81	1.007,38	3.217,58
02/09/2014	1,00	30,96	40,32	1.007,93	3.020,17
03/09/2014	1,00	30,83	39,83	1.007,74	3.005,99
04/09/2014	1,00	30,89	39,36	1.007,58	3.011,85
05/09/2014	1,00	30,36	39,87	1.007,75	2.958,46
06/09/2014	1,00	29,85	39,79	1.007,73	2.907,59
07/09/2014	1,00	33,38	37,26	1.006,80	3.260,13
08/09/2014	1,00	31,86	39,29	1.007,55	3.109,30
09/09/2014	1,00	29,84	39,29	1.007,55	2.905,68
10/09/2014	1,00	32,79	38,25	1.007,19	3.201,55
11/09/2014	1,00	31,30	38,80	1.007,38	3.052,06
12/09/2014	1,00	32,54	38,23	1.007,18	3.176,55
13/09/2014	1,00	32,07	38,21	1.007,17	3.128,99
14/09/2014	1,00	32,46	38,21	1.007,17	3.168,37

15/09/2014	1,00	33,41	37,71	1.006,98	3.263,84
16/09/2014	1,00	31,39	39,22	1.007,53	3.062,08
17/09/2014	1,00	29,83	39,24	1.007,53	2.904,72
18/09/2014	1,00	31,25	39,14	1.007,50	3.047,89
19/09/2014	1,00	30,76	39,12	1.007,49	2.997,99
20/09/2014	1,00	29,88	39,65	1.007,68	2.909,67
21/09/2014	1,00	32,36	38,15	1.007,15	3.158,83
22/09/2014	1,00	33,37	37,66	1.006,96	3.259,74
23/09/2014	1,00	30,90	38,67	1.007,33	3.012,03
24/09/2014	1,00	29,84	39,13	1.007,50	2.906,02
25/09/2014	1,00	29,77	39,15	1.007,50	2.898,28
26/09/2014	1,00	29,78	39,15	1.007,50	2.899,69
27/09/2014	1,00	29,50	39,69	1.007,69	2.872,12
28/09/2014	1,00	31,99	39,19	1.007,52	3.121,89
29/09/2014	1,00	32,40	38,15	1.007,15	3.162,86
30/09/2014	1,00	30,74	39,12	1.007,49	2.996,18

TURBINE FEED WATER PUMP					
Tanggal	P in (Bar)	P out (Bar)	T out (°C)	Volume (V)	Unjuk Kerja, W
01/09/2014	7,98	138,09	177,33	1.123,90	14.622,76
02/09/2014	9,76	167,85	185,40	1.134,96	17.943,15
03/09/2014	9,71	167,55	185,46	1.135,04	17.915,42
04/09/2014	9,80	167,77	185,49	1.135,09	17.930,61
05/09/2014	10,35	177,59	188,58	1.139,41	19.055,41
06/09/2014	10,78	180,05	188,64	1.139,50	19.289,16
07/09/2014	8,05	136,79	177,78	1.124,49	14.477,38
08/09/2014	9,54	164,32	184,80	1.134,12	17.553,46
09/09/2014	10,63	177,19	189,00	1.140,00	18.987,95
10/09/2014	8,71	150,06	180,96	1.128,74	15.955,02
11/09/2014	9,77	166,69	185,01	1.134,41	17.801,45
12/09/2014	8,92	151,97	182,19	1.130,47	16.171,43
13/09/2014	8,88	152,31	182,10	1.130,34	16.212,13
14/09/2014	8,50	145,45	180,18	1.127,65	15.443,08

15/09/2014	8,14	138,83	177,39	1.123,98	14.690,21
16/09/2014	9,70	166,57	185,49	1.135,09	17.806,09
17/09/2014	10,66	178,15	189,45	1.140,63	19.104,41
18/09/2014	9,79	168,02	185,46	1.135,04	17.960,26
19/09/2014	9,82	169,46	186,33	1.136,26	18.139,17
20/09/2014	10,69	179,71	189,39	1.140,55	19.277,96
21/09/2014	8,88	153,29	182,31	1.130,63	16.327,82
22/09/2014	7,98	135,97	178,14	1.124,96	14.397,62
23/09/2014	9,82	167,97	187,14	1.137,40	17.988,15
24/09/2014	10,63	177,42	189,18	1.140,25	19.018,26
25/09/2014	10,66	179,16	189,99	1.141,39	19.232,01
26/09/2014	10,67	179,64	189,75	1.141,05	19.280,32
27/09/2014	10,62	177,27	189,66	1.140,92	19.013,27
28/09/2014	9,25	159,97	184,68	1.133,95	17.090,81
29/09/2014	8,88	151,47	182,88	1.131,43	16.132,75
30/09/2014	9,62	163,39	185,94	1.135,72	17.463,11

BOILER WATER CIRCULATION PUMP				
Tanggal	DP A (Bar)	T out (°C)	Volume (V)	Unjuk Kerja, W
01/09/2014	2,419	339,36	1633,4488	395,13
02/09/2014	2,239	353,48	1809,5004	405,15
03/09/2014	2,231	353,32	1807,4636	403,25
04/09/2014	2,223	355,2	1831,396	407,12
05/09/2014	2,193	359,32	1883,8436	413,13
06/09/2014	2,136	359,36	1884,3528	402,50
07/09/2014	2,432	341,04	1651,1392	401,56
08/09/2014	2,288	355,08	1829,8684	418,67
09/09/2014	2,206	359,08	1880,7884	414,90
10/09/2014	2,35	348,6	1747,378	410,63
11/09/2014	2,258	354,88	1827,3224	412,61
12/09/2014	2,348	350,68	1773,8564	416,50
13/09/2014	2,334	348,64	1747,8872	407,96
14/09/2014	2,375	346,2	1716,826	407,75

15/09/2014	2,479	340,36	1642,4828	407,17
16/09/2014	2,275	356,24	1844,6352	419,65
17/09/2014	2,187	359,99	1892,3727	413,86
18/09/2014	2,273	353,88	1814,5924	412,46
19/09/2014	2,269	355,16	1830,8868	415,43
20/09/2014	2,193	359,44	1885,3712	413,46
21/09/2014	2,382	349,36	1757,0528	418,53
22/09/2014	2,451	339	1630,945	399,74
23/09/2014	2,252	356,96	1853,8008	417,48
24/09/2014	2,185	358,08	1868,0584	408,17
25/09/2014	2,164	359,88	1890,9724	409,21
26/09/2014	2,174	359,6	1887,408	410,32
27/09/2014	2,151	359,64	1887,9172	406,09
28/09/2014	2,295	353,36	1807,9728	414,93
29/09/2014	2,348	347,2	1729,556	406,10
30/09/2014	2,276	353,4	1808,482	411,61



## BIODATA PENULIS



Penulis merupakan putra kedua dari Ibunda Retno Aprianingsih Herawatie dan Ayahanda Siswahyoedi. Penulis dilahirkan di Surabaya, 13 Nopember 1993 yang bertempat tinggal di Jl. Gubeng Klingsingan IV/12 Surabaya. Penulis mempunyai cita-cita membuat pesawat terbang seperti bapak Habibie.

Penulis telah menempuh pendidikan formal di beberapa sekolah yaitu :

1. SDN GUBENG 1 No 204 Surabaya ( 1999 – 2005 )
2. SMPN 6 Surabaya ( 2005 – 2008 )
3. SMAN 2 Surabaya ( 2008 – 2011 )

Penulis bersekolah di SDN Gubeng 1 selama 6 tahun, pada nilai ujian nasional penulis mendapatkan peringkat 3 terbaik se sekolah. Selanjutnya, penulis melanjutkan sekolah di SMPN 6 selama 3 tahun, penulis mendapatkan kesempatan masuk kelas bilingual dan mendapatkan nilai ujian nasional matematika 10, kemudian penulis melanjutkan ke SMAN 2 selama 3 tahun dan masuk program IPA. Penulis melanjutkan kuliah di Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan jurusan S-1 Teknik Fisika dengan jalur SNMPTN Undangan.